

9  
24.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROCESO DE FUNDICION - ATOMIZACION  
PARA LA OBTENCION DE POLVOS  
METALICOS**

**TESIS MANCOMUNADA  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A N :  
CARLOS RAUL MAGAÑA ZAVALA  
ARTURO ZERMEÑO FERNANDEZ**



**MEXICO, D. F.**

**1997**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: PROF. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO**

**VOCAL: PROF. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA**

**SECRETARIO: PROF. GERARDO ARÁMBURO PÉREZ**

**1er. SUPLENTE: PROF. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA**

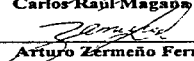
**2do. SUPLENTE: PROF. SERGIO GARCÍA GALÁN**

**Sitio donde se desarrollo el tema: Laboratorio de Fundición  
Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica.  
Facultad de Química, Edificio D, UNAM**

Asesor del tema:   
I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Supervisor Técnico:   
M. en C. Carlos González Rivera

Sustentantes:   
Carlos Raúl Magaña Zavala

  
Arturo Zermeno Fernández

## ÍNDICE GENERAL.

Resumen.....	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	
1.1 Problemática y justificación.....	3
1.2 Objetivos.....	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>ANTECEDENTES.</b>	
2.1 Principios básicos en la producción de polvo metálico.....	5
2.2 Procesos generales para la obtención de polvo metálico.....	6
2.2.1 Métodos físicos.....	7
2.2.2 Métodos químicos.....	8
2.2.3 Métodos mecánicos.....	9
2.3 Características requeridas en el polvo metálico.....	9
2.4 Proceso de atomización con aire.....	10
2.4.1 Parámetros en el proceso de atomización.....	12
2.4.2 Efecto de los parámetros sobre las características del polvo metálico.....	14
2.5 Caracterización del polvo metálico.....	20
2.5.1 Tamaño de partícula.....	20
2.5.2 Forma de la partícula.....	21
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	
3.1 Diseño del equipo experimental.....	24
3.1.1 Sistema de alimentación y distribución del metal.....	25
3.1.2 Sistema de boquillas.....	26
3.1.3 Cámara de atomización.....	29

3.2 Preparación del material.....	30
3.3 Control de parámetros.....	30
3.3.1 Parámetros de diseño fijos durante todo el proceso.....	31
3.3.2 Diseño experimental.....	32
3.4 Procedimiento experimental.....	33
3.5 Caracterización del polvo metálico obtenido.....	35

#### CAPÍTULO 4

##### RESULTADOS.

4.1 Resultados obtenidos.....	38
4.1.1 Tamaño de partícula.....	38
4.1.2 Forma de la partícula.....	44

#### CAPÍTULO 5

##### ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 Efecto de la presión y la temperatura sobre el tamaño de partícula.....	50
5.2 Efecto de la presión y la temperatura sobre la forma de la partícula.....	51

#### CAPÍTULO 6

##### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones.....	55
6.2 Recomendaciones para trabajos posteriores.....	56

BIBLIOGRAFÍA.....	58
-------------------	----

## DEDICATORIA

A mis padres:

VIRGINIA FERNÁNDEZ OCHOA.

ARTURO ZERMEÑO PÉREZ.

A ti Mamá porque has estado conmigo desde mis primeras enseñanzas y porque con tu amor y dedicación has cuidado de mí como la mejor de las madres.

A ti Papá por apoyar mis decisiones, por lo sabio de tus consejos y sobre todo, por tus esfuerzos para hacer de mí una mejor persona.

A ambos por haber sido un gran soporte a lo largo de mi formación académica y porque juntos han logrado otorgarme una invaluable educación.

A mis hermanas Virginia y Nayeli, con ustedes he compartido grandiosos momentos y también difíciles a lo largo de mi vida, pero siempre me han impulsado a superarme.

A ti Abril por ser el más grande motivo de mi vida, por tu estímulo, tu comprensión y sobre todo, por el inmenso cariño que de ti recibo día con día.

## AGRADECIMIENTOS

**A mis compañeros y amigos de escuela,  
gracias por su valiosa compañía, por los  
buenos momentos y la ayuda otorgada.**

**A los amigos que me vieron nacer, crecer  
y quienes siempre han deseado lo mejor  
para mí.**

**A todas aquellas personas que hicieron  
posible la culminación de esta meta.**

## DEDICATORIA.

A Dios, mil gracias  
Señor por estar  
siempre a mi lado.

A mi Mamá por enseñarme que no hay nada imposible,  
y que todo se logra si se da siempre tu máximo esfuerzo  
Gracias por el amor con que has formado a esta familia,  
por tus noches de desvelo y a tu vida dedicada a nosotros.

Mil gracias.

Aurora Zavala Romero.

A mi Papá, porque en ti tengo el mejor ejemplo de superación, de  
responsabilidad y amor al trabajo. Gracias por compartir conmigo tu  
anhelo de ser mejor, el cual nos impulsa a culminar con éxito todos  
nuestros propósitos.

Raúl Megaña Zamora.

A mi hermana y confidente, porque juntos hemos compartido cosas  
hermosas de la vida. Gracias por tus consejos y regaños y por com-  
partir conmigo tu alegría de vivir.

Te quiero.

Iliana Aurora Megaña Zavala.

A mi hermano y amigo, por tu temura y rebeldía, porque te quiero y  
deseo ayudarte a externar toda tu capacidad ante los retos de la vida.

Erick Raúl Megaña Zavala.

A mi sobrino, porque cada sonrisa tuya es un amanecer de esperanza.

A toda mi familia a quien quiero mucho, con el deseo de seguir compartiendo momentos felices y  
logros importantes como este.



## **AGRADECIMIENTOS.**

**Agradezco de manera especial a mis amigos de los cuales de una u otra manera me ayudaron a ser lo que soy ahora. Mil gracias.**

**Cito a mis amigos de tal modo en el que llegaron a mi lado :**

**Ulises M., Manuel H., Minerva, Dolores, Marisol, Ena, Silvia Fa C., Nancy F., Verónica, Claudia, Yolanda G., Atenea , Pili , Nadia, Hazel G., Nancy y Ana T., Romualdo O., Fernanda Z., Hugo M., Carlos H., Juan L., Jessica N., Rocío B., Sergio F., Ricardo P., Dory , Arlette , Ángeles , Carlos C., Laura A., Ruth R., Lucero , Yoselin, Carmen, Jenny M., Dianne P., Anita, Yuriria Z., y Arturo Z.**

Agradecemos conjuntamente y de manera especial, a nuestro asesor el I.Q.M. Eusebio Cándido Allatenco Tiapanco por su paciencia y la confianza al brindarnos la oportunidad y las facilidades para la realización de este trabajo.

Agradecemos también al jurado revisor por el tiempo dedicados y por los valiosos comentarios hechos a esta tesis.

Nuestro infinito agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por los conocimientos adquiridos durante nuestra formación profesional.

La felicidad no es hacer toda la vida lo que queremos sino querer toda la vida lo que hacemos.  
Anónimo.

**Resumen.**

En este trabajo, se estudian algunos de los parámetros para obtener polvos metálicos y para esto se realiza la construcción de un equipo productor de polvo metálico, basado en el proceso de atomización con aire, considerando los parámetros principales y su influencia sobre el tamaño y forma de partícula del polvo de aluminio.

La importancia del trabajo reside en que sea una forma alternativa de la producción de polvos, ya que a nivel industrial el proceso resulta costoso. De acuerdo a experimentación previa este proceso puede resultar económico.

La hipótesis principal del trabajo se basa en que la forma y el tamaño de las partículas se ven directamente afectados tanto por las propiedades del metal líquido así como por las condiciones de trabajo del proceso (Temperatura del metal líquido y presión de atomización).

A partir de la hipótesis formulada, se desarrollaron pruebas en las que se obtuvo polvo metálico, el cual fue analizado y caracterizado, con lo que será posible tener un enfoque general acerca de lo realizado en este trabajo.

## **CAPITULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN.**

## **1.1 Problemática y justificación.**

En la actualidad, son pocos los estudios (a nivel experimental, en nuestro país) que se tienen reportados respecto a la fabricación de polvo metálico, la mayor parte de la información relacionada con este tema proviene del extranjero y principalmente de la unión americana.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende analizar el tema desde un punto de vista -teórico/práctico-, por lo que se requirió de la construcción de un equipo de atomización, el cual abarca como fundamentos los principios de fundición, procesos alternos de manufactura, ingeniería, entre otros. Esto nos habla de lo extenso que es el tema y de como resulta necesario realizar ciertas consideraciones, para la simplificación en el diseño del equipo.

Con esto, se podrá contar con cierta información experimental, lo que permitirá continuar con la realización de estudios posteriores.

## **1.2 Objetivos.**

Como objetivo principal de esta tesis se plantea la obtención de polvos metálicos por el proceso de atomización, así como el estudio de algunas variables de proceso y del metal líquido sobre el rendimiento y morfología de los polvos obtenidos.

## **CAPITULO 2.**

### **ANTECEDENTES.**

## **2.1 Principios básicos en la obtención de polvo metálico.**

Una parte importante en los procesos de la metalurgia de polvos, es la producción del polvo metálico. Esta etapa del proceso consiste básicamente en la obtención de pequeñas partículas a partir del material primario, ya sea este una placa, un lingote, una barra, una corriente de metal fundido o una solución acuosa saturada de iones metálicos, según sea el método utilizado.

Anteriormente se pensó en la metalurgia de polvos como un método de manufactura para aquellos metales con alto punto de fusión o en los que el trabajado mecánico convencional era extremadamente difícil y en algunos casos imposible. Esto trajo muy buenos resultados con lo que en la actualidad la metalurgia de polvos, a base de estudios y pruebas, es uno de los métodos o procesos de manufactura más rentable y que además ofrece mejores resultados respecto a las propiedades mecánicas de las piezas industriales (principalmente del tipo automotriz) fabricadas con polvo metálico de distintos materiales ferrosos y no ferrosos.

La fabricación de polvo metálico se enfoca primordialmente en su consolidación como piezas industriales que requieren ciertas propiedades mecánicas, sin embargo, la aplicación industrial de los polvos metálicos se extiende cada vez más con el desarrollo de la tecnología ya que el polvo metálico es utilizado con otros propósitos basados en sus características y propiedades. Estos son usados comercialmente en pinturas, barnices, tintas de impresión, reactivos

químicos, electrodos para soldadura, en la industria eléctrica, y militarmente se aplican para la elaboración de explosivos.

La razón principal para producir polvo metálico tiene una base económica. El costo en la producción de una pieza metálica se minimiza ya que las tolerancias dimensionales son menores que por cualquier otro método de manufactura en los cuales se aplica un trabajado mecánico adicional, lo que representa pérdidas de material y gastos de operación. Además las piezas elaboradas a partir de polvos metálicos ofrecen mejores propiedades mecánicas ( teniendo un mejor control sobre la porosidad de las piezas y la eliminación de segregaciones en los límites de grano ) que aquellas realizadas por métodos convencionales de manufactura.

## **2.2 Procesos generales para la obtención de polvo metálico.**

Existen distintos métodos para la producción de polvo metálico, todos ellos tienen la finalidad de obtener pequeñas partículas con ciertas características en cuanto a tamaño y forma, de acuerdo al método, al material utilizado y a su aplicación.

Los métodos principales para la fabricación de polvo metálico pueden dividirse en tres categorías:

- Métodos físicos.
- Métodos químicos.
- Métodos mecánicos.



### **2.2.1 Métodos Físicos.**

Los métodos físicos más importantes para la producción de polvo son los llamados métodos por atomización los cuales han sido desarrollados de una manera más o menos empírica, es decir, basándose principalmente en la experimentación. Dichos métodos consisten en el rompimiento de una corriente de metal fundido produciendo pequeñas gotas que a su vez se enfrían como partículas de polvo cuyo tamaño suelen ser menores a  $150\ \mu\text{m}$  y mayores a  $38\ \mu\text{m}$  para los procesos de metalurgia de polvos ( compactación y sinterización ); partículas de polvo menores a  $38\ \mu\text{m}$  tienen aplicación en la industria de pinturas. Este proceso en general puede ser aplicado a cualquier material en estado líquido que posteriormente solidifique.

El rompimiento de la corriente líquida puede llevarse a cabo de diversas maneras, algunas de ellas son:

Por la acción de choque de otro fluido como sería gas inerte, aire, agua, o la combinación de los dos últimos a alta presión a través de toberas sobre la corriente metálica líquida. A esto se conoce generalmente como atomización de dos fluidos, es decir el agente atomizado que en este caso es la corriente de metal líquido y el medio atomizador, el cual puede ser gas inerte, agua o aire. Los agentes atomizadores cumplen una doble función en el proceso, ya que primero desintegran la corriente metálica en pequeñas partículas y posteriormente influyen en el proceso de solidificación y enfriamiento de las mismas.

Otra forma es el uso de la fuerza centrífuga como en el caso del disco rotatorio, en el que la corriente líquida se vierte sobre un disco metálico que gira a gran velocidad. El rompimiento se realiza por la fuerza con que el metal se proyecta después del contacto con el mismo disco.

También se utiliza el electrodo rotatorio. En este método una barra de metal se encuentra girando y entra en contacto con un electrodo (de tungsteno) que debido a la resistencia que este opone, transforma la energía eléctrica en el calor necesario para que la barra se funda y por la acción de giro, el metal se proyecta centrifugamente en forma de pequeñas partículas generalmente de forma esférica.

### **2.2.2 Métodos químicos.**

Los métodos químicos son menos comunes y son aquellos en los cuales el polvo metálico es producido por descomposición química de un compuesto del metal. Tal es el caso de las reacciones de reducción de óxidos finamente divididos a partículas de polvo metálico con la ayuda de gases reductores.

El polvo también se puede obtener a partir de una solución acuosa en la que el metal se encuentra disuelto en la solución, al añadir una sustancia reductora, el metal se precipita. A esto se conoce como proceso de cementación.

Otro proceso es la deposición del metal a partir de un electrolito por acción de una corriente eléctrica.

### **2.2.3 Métodos mecánicos.**

En estos métodos, ciertos tipos de polvos pueden ser producidos por los procesos de conminución ( reducción de tamaño ) mecánica generalmente utilizados en materiales frágiles. Los metales o aleaciones pueden ser fragilizados de tal manera que pueden ser conminuidos mecánicamente. La fragilización se puede dar por tratamiento térmico o por la deformación del metal por medios mecánicos, estos procesos son menos comunes que los anteriormente mencionados.

### **2.3 Características requeridas en el polvo metálico.**

La evaluación del efecto en los cambios del proceso sobre las características del polvo requiere de técnicas apropiadas para la medición de los parámetros de las partículas. Las características más importantes de los polvos metálicos se incluyen en los siguientes parámetros:

1. Tamaño de partícula
  - Distribución de tamaño.
  - Tamaño medio o promedio.

**2. Forma de la partícula.**

- Densidad aparente.
- Velocidad de derrame.
- Área superficial.

**3. Estructura de la partícula.**

- Densidad real.
- Tamaño de grano.
- Composición química de la partícula.

Estas características son controladas por las variables en el proceso para determinar las propiedades ingenieriles y su posterior aplicación.

**2.4 Proceso de atomización con aire.**

Como se mencionó anteriormente la atomización se puede definir como el rompimiento de una corriente de metal líquido produciendo finas gotas de metal que a su vez se enfrían, obteniendo así el polvo metálico, cuyo tamaño suele estar entre 150 y 38  $\mu\text{m}$ . Este proceso en general puede ser aplicado a cualquier material que pueda presentar un estado líquido y que posteriormente solidifique.

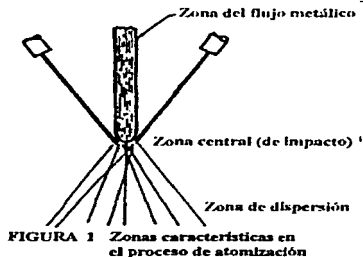
Generalmente el metal fundido es vaciado directamente sobre el distribuidor, el cual provee un flujo uniforme y controlado a través de la boquilla. Ésta, la cual se encuentra localizada en la base o parte inferior

del distribuidor, controla la forma y el tamaño de la corriente metálica y la dirige hacia la zona de atomización, donde el sistema de jets desintegra el metal en finas partículas debido a la acción de impacto ejercida por el aire, el cual es el medio atomizador.

Las partículas metálicas solidificadas y enfriadas, se depositan en el fondo de la cámara de atomización, donde finalmente son recolectadas.

La atomización con aire se caracteriza por presentar tres zonas de metal durante el proceso (*figura 1*); estas zonas se clasifican de la siguiente manera:

1. **La zona del flujo metálico.** Esta zona se encuentra ubicada en la parte superior del flujo metálico, y es donde comienza la caída libre del metal desde el distribuidor hasta la zona del apex, esta zona presenta un flujo continuo de metal..
2. **La zona de impacto.** Esta zona se ubica en la parte central del proceso, y es donde el flujo de metal líquido converge con el agente atomizador rompiendo al flujo y atomizando al metal.
3. **La zona de dispersión.** Esta zona es la última parte del proceso de atomización, ya que es cuando el metal ya atomizado sigue la misma trayectoria de la geometría de los jets, estas trayectorias de las partículas son individuales y son forzadas debido a la fuerza gravitatoria y a la misma acción del agente atomizador.



#### 2.4.1 Parámetros en el proceso de atomización.

El diseño y control de las variables del proceso de atomización pueden tratarse de tal modo que se obtengan las características deseadas del polvo metálico, entre estos parámetros se incluyen:

1. Propiedades del metal líquido.
  - Viscosidad.
  - Tensión superficial.
  - Composición química.
  - Sobrealentamiento del metal líquido
2. Geometría del flujo de metal líquido.
  - Diámetro de la boquilla del distribuidor.
  - Longitud de la corriente metálica.
  - Velocidad del flujo metálico.

3. Parámetros de los jets o boquillas atomizadoras.
  - Geometría ( forma ) de los jets.
  - Ángulo de inclinación.
  - Localización de los jets.
  - Número de jets.
  - Distancia entre jets.
  - Distancia entre jets y corriente metálica
  
4. Flujo en los jets.
  - Presión de atomización.
  - Velocidad del agente atomizador.
  - Viscosidad del agente atomizador.
  - Densidad del agente atomizador.
  
5. Atmósfera.
  - Tipo de atmósfera durante la fusión.
  - Tipo de atmósfera en la cámara de atomización.
  
6. Cámara de atomización.
  - Trayectoria recorrida desde el punto de atomización hasta la zona de recolección.
  - Tipo del medio de enfriamiento.

Son de particular importancia, en la fabricación de polvos metálicos; las relaciones existentes entre las propiedades de los polvos y los parámetros de atomización.

#### 2.4.2 Efecto de los parámetros sobre las características del polvo metálico.

Para el análisis de la atomización con gas (aire) existen modelos empíricos que explican de una manera teórica el posible comportamiento del proceso.

Uno de estos modelos es el desarrollado por Dombrowski y Johns (referencia 13), el cual habla a cerca del rompimiento o la desintegración de la hoja (corriente) de metal líquido, lo cual involucra la formación de ligamentos y la subsecuente separación de los ligamentos en pequeñas gotas (partículas). A partir de un balance de fuerzas entre la presión del gas (aire), la tensión superficial y las fuerzas de inercia del metal líquido, llegaron a la ecuación para el diámetro del ligamento formado a partir de la hoja líquida, la cual esta expresada como :

$$d_L = 0.9614 \left( \frac{K^2 \sigma^2}{\rho_L U^4} \right)^{\frac{1}{6}} \left( 1 + 2.6 \left( \frac{K \rho^4 U^7}{72 \rho_L^2 \sigma^5} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{1}{5}} \dots \dots \dots (\text{Ec. 1})$$

Donde :

$d_L$  es el diámetro del ligamento ( cm ).

$\rho_L$  es la densidad del metal líquido ( g / cm<sup>3</sup> ).

$\sigma$  es la tensión superficial del metal líquido ( g / s<sup>2</sup> ).

$\rho$  es la densidad del gas (aire) de atomización ( g / cm<sup>3</sup> ).



$K$  es el espesor de la hoja (corriente) de metal líquido multiplicada por la distancia recorrida por el metal líquido antes de ser impactado por el aire (  $\text{cm}^2$  ).

$U$  es la velocidad del gas (aire) (  $\text{cm} / \text{s}$  ).

A partir de la ecuación 1, es posible predecir el diámetro del ligamento que puede ser obtenido al modificar las propiedades del metal líquido y la velocidad del agente atomizador, la ecuación también indica que al incrementar la velocidad del agente atomizador disminuye el tamaño de la partícula.

El valor del diámetro del ligamento, al ser introducido en la ecuación 2, permite predecir teóricamente el diámetro de la partícula que es posible obtener al término de la desintegración del metal líquido.

$$d_p = \left( \frac{3\pi}{\sqrt{2}} \right)^{\frac{1}{3}} d_L \cdot \left( 1 + \frac{3\mu}{(\rho_L \cdot \sigma \cdot d_L)^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{6}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 2})$$

Donde :

$d_p$  es el diámetro de la partícula (  $\text{cm}$  ).

$d_L$  es el diámetro del ligamento (  $\text{cm}$  ).

$\rho_L$  es la densidad del metal líquido (  $\text{g} / \text{cm}^3$  ).

$\sigma$  es la tensión superficial del metal líquido (  $\text{g} / \text{s}^2$  ).

$\rho$  es la densidad del gas (aire) de atomización (  $\text{g} / \text{cm}^3$  ).

$\mu$  es la viscosidad del metal líquido (  $\text{g} / \text{cm} \cdot \text{s}$  ).

Por otro lado, en el proceso de atomización, las fuerzas de tensión superficial tienden a transformar una partícula que se encuentra en estado líquido desde una forma irregular a una forma esférica, de tal modo que esta solidifique posteriormente manteniendo dicha forma. Así, conociendo el valor del tamaño medio de partícula, es posible predecir la forma de la partícula a partir de los siguientes dos modelos desarrollados por Nichiporenko y Naida (referencia 1) :

$$t_{esf} = \frac{3\pi^2 \mu}{4V\sigma} (r_1^4 - r_2^4) \dots\dots\dots (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$t_{esf}$  es el tiempo de esferoidización ( s ).

$\sigma$  es la tensión superficial del metal líquido ( N / s ).

$\mu$  es el coeficiente de viscosidad del metal líquido ( g / cm \* s ).

$V$  es el volumen de la partícula ( cm<sup>3</sup> ).

$r_1$  es el radio de la partícula después de la transformación a la forma esférica ( cm ).

$r_2$  es el radio de la partícula (ligamento) antes de la transformación a la forma esférica ( cm ).

$$t_{sol} = \frac{d\rho_L}{h} (Cp)_m \ln \frac{T_L - T_g}{T_m - T_g} \dots\dots\dots(\text{Ec. 6})$$

Donde :

$t_{sol}$  es el tiempo de solidificación de la partícula ( s ).

$\rho_L$  es la densidad del metal líquido ( g / cm<sup>3</sup> ).

$d$  es el diámetro de la partícula ( cm ).

$h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección  
( Cal / s cm<sup>2</sup> °C ).

$(Cp)_m$  es el calor específico del metal ( Cal / g °C ).

$T_L$  es la temperatura del metal líquido ( °C ).

$T_g$  es la temperatura del gas ( °C ).

$T_m$  es la temperatura de fusión del metal ( °C ).

El tiempo de esferoidización se puede definir como el tiempo requerido para que las fuerzas de cohesión y de tensión superficial actúen sobre la gota de metal líquido, haciendo que el metal líquido cambie de una forma de gota o de ligamento (irregular) a una forma esférica o lo más cercano a ella.

El tiempo de solidificación indica el tiempo ocupado por el metal para pasar de la fase líquida a la fase sólida.

Entre estos dos tiempos existe un intervalo, el cual determina la posible forma que pueden adquirir las partículas durante su transición del

estado líquido al estado sólido, de tal modo que si se da el tiempo necesario para que las partículas terminen de esferoidizar e instantáneamente se presente la solidificación de las mismas (esto con el fin de no permitir que la partícula presente deformaciones posteriores provocadas por el impacto con el agente atomizador o por colisiones entre las mismas partículas), se obtendrán partículas de forma esférica para un intervalo de tiempo adecuado.

De las dos ecuaciones anteriores es de entenderse que el tiempo de esferoidización (tiempo requerido para que la partícula líquida tome forma esférica) deba ser menor al tiempo de solidificación de la partícula con lo que la forma de las partículas tenderá a ser esférica; por el contrario, si el tiempo de esferoidización es mayor que el tiempo de solidificación, la forma de la partícula tenderá a ser irregular.

Se precisa entonces, que la velocidad de solidificación deba ser menor que la velocidad con la que actúa la fuerza de tensión superficial sobre las partículas metálicas para que el resultado sea el de obtener partículas de polvo con forma esférica.

Basados en la revisión bibliográfica y en los modelos mencionados, se observa que las características principales del polvo metálico se ven directamente afectadas por el control o variación de los parámetros del proceso y por las propiedades del metal líquido, por lo tanto, se espera que:

Un tamaño pequeño de partícula se vea favorecido por:

- Baja viscosidad del metal líquido.

- **Baja tensión superficial del metal líquido.**
- **Incremento en el sobrecalentamiento.**
- **Bajo flujo de metal líquido.**
- **Alta presión de atomización.**
- **Elevado volumen de agente atomizador (aire).**
- **Alta velocidad del agente atomizador (aire).**
- **Distancia corta entre la corriente metálica y boquillas de atomización (jets).**
- **Longitud pequeña entre la corriente metálica y la zona de impacto.**
- **Ángulo óptimo de los jets.**

La tendencia a la esferoidicidad de las partículas se incrementa con:

- **Alta tensión superficial del metal líquido.**
- **Mínimo sobrecalentamiento del metal líquido.**
- **Diferencia estrecha entre el tiempo de esferoidización y el tiempo de solidificación**

Por último, la estructura de la partícula sea afectada por:

- **La composición química del metal.**
- **Se producen cambios con:**
  - a).- **Altas temperaturas.**
  - b).- **Enfriamientos lentos.**
  - c).- **Altas presiones de atomización.**
- **La microestructura esta en función de la velocidad de solidificación.**

## **2.5 Caracterización del polvo metálico.**

Una vez obtenido el polvo metálico, se procede a realizar la caracterización del mismo, con el fin de conocer ciertas propiedades tanto físicas como ingenieriles, de tal modo que la posterior aplicación del polvo metálico pueda ser determinada.

### **2.5.1 Tamaño de partícula.**

La descripción cuantitativa del tamaño de partícula se realiza por análisis de mallas, lo cual permite conocer la distribución del tamaño de partícula, el tamaño promedio de partícula y también es posible conocer el rendimiento del proceso.

En el análisis de mallas se utilizan series de cribas colocadas por orden de abertura de la malla de manera decreciente, las cuales, generalmente pueden ir desde mayores a 600  $\mu\text{m}$  hasta tamaños menores a 20  $\mu\text{m}$ . Esto permite conocer las cantidades contenidas en cada una de las cribas, es decir, la cantidad de material respecto a tamaños específicos.

El resultado de un análisis de cribado se da como la fracción de la muestra que pasa a través de una malla, pero que es retenida por la siguiente.

El tamizado o cribado nunca puede ser exacto. Esto viene del hecho de que las partículas poseen generalmente formas complejas y, así, la probabilidad de que pasen por la malla depende de la manera en que caigan. Esta probabilidad depende también del tiempo de cribado. Así, se han desarrollado procedimientos estandarizados para poder dar resultados con características comunes. Por esta razón se piensa que los valores de rendimiento en el proceso pudieran verse afectados.

### **2.5.2 Forma de la partícula.**

La caracterización de la partícula se expresa de manera cualitativa bajo los términos de esférica a irregular debido a la gran variedad de formas que se pueden dar, tales como la forma esférica, nodular, redondeada, de tipo cilíndrica e irregular.

El análisis de forma en la partícula permite determinar algunas de las propiedades ingenieriles de las cuales cabe mencionar la densidad aparente, rapidez de flujo o velocidad de derrame y área superficial.

Una manera de caracterizar la forma de las partículas de tal modo que el proceso pueda ser generalizado, es mediante la relación longitud-diámetro ( $L/D$ ). Cuando la relación se acerca a 1, esto indica que la forma de la partícula tiende a ser esférica. Por el contrario si este valor aumenta, la forma de las partículas tenderá a ser irregular (referencia 2).

**Nota:** Es importante recalcar, que aunque se mencionan propiedades derivadas de las características físicas del polvo metálico como lo es el tamaño medio, la densidad aparente, rapidez de flujo y área superficial. Éstas no serán analizadas en este trabajo debido a que no se cuenta con el equipo debidamente estandarizado para su realización; además de no ser el objetivo primordial de esta tesis.

Tampoco se realiza un análisis de la estructura, la cual involucra el tamaño de grano, el grado de porosidad, así como el grado de oxidación de las partículas.



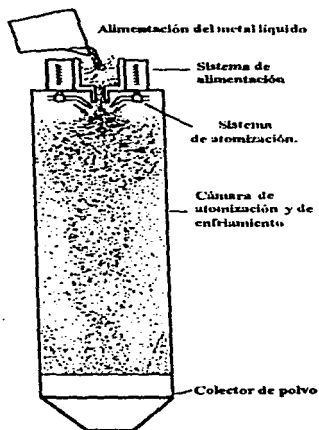
## **CAPITULO 3.**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

### 3.1 Diseño del equipo experimental.

La unidad de atomización desarrollada para fabricar polvo de aluminio en este estudio se muestra en la *figura 2*.

El sistema entero fue diseñado para operar a la temperatura máxima de 950 °C.



**FIGURA 2** Equipo de atomización desarrollado para el estudio experimental

### 3.1.1 Sistema de alimentación y distribución de material.

El sistema cuenta con un distribuidor (*figura 3*), el cual presenta las siguientes dimensiones:

Diámetro interno superior	48.7 mm.
Diámetro interno inferior	38.6 mm
Diámetro interno de la boquilla	1.96 mm.
Longitud de la boquilla del distribuidor	9.9 cm.

El distribuidor tiene una longitud total de 19.5 cm. de largo.

La principal función del distribuidor es controlar la velocidad del flujo metálico, y proveer un flujo uniforme. El distribuidor es mantenido a la temperatura de vaciado mediante un pequeño horno calentado por resistencias eléctricas, localizado en la parte superior externa de la cámara de atomización. Este cumple un papel muy importante ya que sus funciones son:

- Evitar que el distribuidor se rompa por choque térmico.
- Controlar la temperatura de vaciado del metal a atomizar.
- Asegurar que las pérdidas de calor del metal líquido durante la corrida sean mínimas.
- Evitar que el metal solidifique dentro del distribuidor.

El metal es fundido en cargas de 2 a 3 Kg, en un horno de gas anexo al sistema, esto para que el proceso sea más rápido y se puedan trabajar mayores volúmenes de metal.

El metal líquido proveniente del horno de gas es cargado dentro del distribuidor donde se controla la temperatura de vaciado.

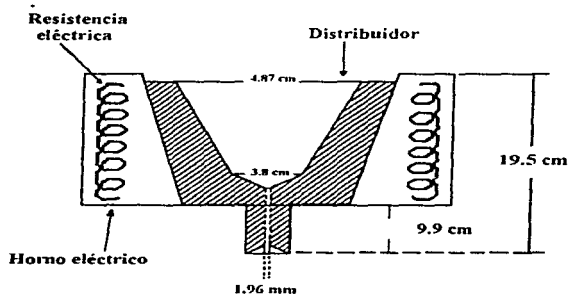


FIGURA 3 Sistema de alimentación

### 3.1.2 Sistema de boquillas.

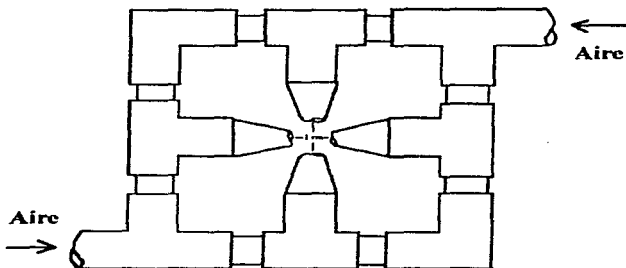
El sistema de jets que se utiliza para la atomización del flujo metálico presentan un arreglo de 4 boquillas (figura 4a, 4b), de las cuales, cada una de ellas presenta en su extremo de salida una geometría elíptica, con dimensiones de 3.1 por 2.9 mm, esto con el fin de formar una cortina de

aire (figura 4c) y así asegurar que el flujo de metal sea desintegrado y dispersado durante el ensayo.

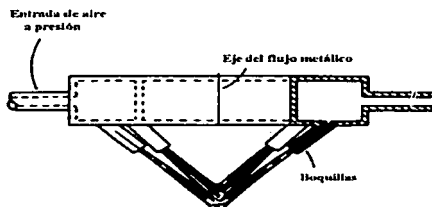
El sistema controla el flujo del medio atomizador y lo dirige hacia la parte inferior del distribuidor, donde interactúa con el metal líquido cuando este fluye por dicho distribuidor.

La interacción se realiza debido a la fuerza con que el aire impacta al metal líquido (zona central, fig.1), esto causa que el metal líquido sea desintegrado formando una cortina con la apariencia de un cono o abanico dando como resultado la dispersión de las partículas y a su vez minimizando la posibilidad de impacto entre ellas.

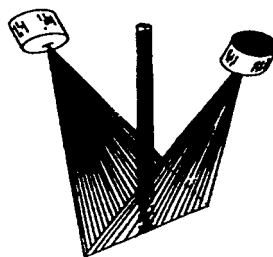
El ángulo de inclinación para cada boquilla es de  $20^\circ$  respecto al flujo metálico, el cual fluye en forma vertical.



(a) Vista superior



(b) Vista lateral



(c) Formación de la cortina de atomización.

FIGURA 4. Sistema de boquillas. (a) Vista superior, (b) Vista lateral  
(c) Formación de la cortina de atomización.

### **3.1.3 Cámara de atomización.**

En la cámara de atomización se encuentran instalados los demás sistemas ya mencionados con anterioridad (Fig.2).

La cámara funciona como un contenedor, ya que mantiene al polvo metálico dentro de ella.

La cámara de atomización cuenta con las siguientes dimensiones :

Su geometría es rectangular, y mide 49 cm. de ancho por 184 cm. de altura y 46 cm. de profundidad.

La instalación de una ventana (mirilla) además de permitir observar el momento en que se lleva a cabo el proceso de atomización, ofrece la ventaja de que en caso de requerirse, puedan ser ajustadas de manera sencilla cualquiera de las boquillas, tanto del distribuidor como del sistema de jets.

La ventana y un sistema de iluminación, el cual se encuentra dentro de la cámara, podrían permitir la toma de fotografías de la zona de atomización cuando se realizan las pruebas.

El metal pulverizado y solidificado es recolectado en una tolva que se encuentra en la parte inferior dentro de la cámara.

La tolva presenta un ángulo de inclinación de 45°, esto para favorecer el deslizamiento y el arrastre del polvo hasta el recolector.

### **3.2 Preparación del material.**

El material utilizado es aluminio comercialmente puro (99.7 % Al), debido a que es uno de los metales con mayor importancia industrial y comercial.

La temperatura de fusión del aluminio es de aproximadamente 660 °C.

Para asegurar que el metal fuese el mismo durante todas las corridas, se fundió un lote completo de 15 Kg del metal en una misma fusión, así se asegura que el metal tuviese la misma composición química.

### **3.3 Control de parámetros.**

Los parámetros más importantes a controlar son la presión del agente atomizador y la temperatura de sobrecalentamiento del metal líquido, los cuales se consideran como parámetros variables y específicos para cada prueba que se realice; los parámetros restantes, referidos a las condiciones de trabajo del equipo de atomización, se mantendrán fijos durante todas las pruebas realizadas.



### 3.3.1 Parámetros de diseño fijos durante todo el proceso.

Los parámetros de diseño que se mantuvieron fijos durante el proceso se encuentran representados en la *figura 5* y se describen a continuación:

El diámetro de salida ( $d$ ) del distribuidor es de 1.96 mm.

El flujo másico promedio del metal alimentado es de 5 g/s.

La distancia recorrida ( $L$ ) por el metal líquido hasta el punto de impacto es de 1.77 cm.

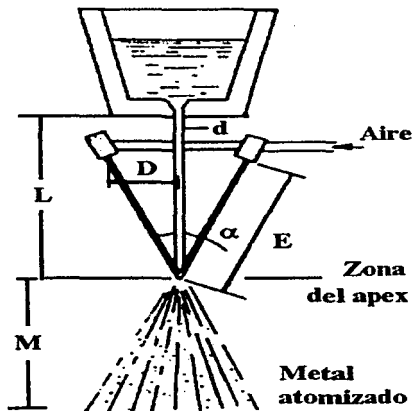
La distancia ( $E$ ) entre las boquillas de atomización y la zona de impacto es de 1.46 cm.

La distancia ( $D$ ) entre cada jet y la corriente metálica es de 0.5 cm.

El área de salida en cada boquilla de atomización es de .29 cm<sup>2</sup>.

El ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) de las boquillas de atomización respecto al flujo metálico es de 20°.

La distancia ( $M$ ) que recorre las partículas atomizadas a partir de la zona de impacto y durante la cual solidifican varía aproximadamente desde 70 hasta 173 cm , ya que podrían existir colisiones entre estas y las paredes de la cámara (esto afectará el rendimiento del proceso).



**FIGURA 5** Parámetros de diseño.

### 3.3.2 Diseño experimental.

La temperatura del horno eléctrico es la misma que la temperatura de vaciado para asegurar el mejor control de la misma, así como para evitar al mínimo las pérdidas de calor, lo que podría afectar a los resultados de las pruebas.

Posteriormente se procedió a variar:

- La presión del agente atomizante.
- La temperatura de sobrecalentamiento del metal líquido.

Se tomaron muestras de aproximadamente 150 g para cada prueba, y se trabajaron temperaturas de 750, 800 y 850 °C; Así como presiones de 413, 620 y 827 KPa.

La relación entre la variación de parámetros se muestra en la siguiente tabla:

PRESIÓN / TEMPERATURA	750 °C	800 °C	850 °C
413 KPa	T1 / P1	T2 / P1	T3 / P1
620 KPa	T1 / P2	T2 / P2	T3 / P2
827 KPa	T1 / P3	T2 / P3	T3 / P3

### 3.4 Procedimiento experimental.

En general, para cada una de las pruebas, se procedió de la siguiente manera:

- El horno eléctrico fue calentado por incrementos pequeños de temperatura, lo que permitió que el distribuidor alcanzara la temperatura de trabajo (temperatura de vaciado para cada prueba) asegurando así el control de la misma.

- El metal se fundió en cargas de 2 a 3 Kg, en un horno de crisol a base de gas, y en particular, se dio a este un sobrecalentamiento de 50 °C por encima de cada una de las temperaturas de trabajo.
- De la carga total se tomó una pequeña cantidad de aproximadamente 150 g, la cual se vació rápidamente dentro del distribuidor donde la temperatura fue medida con un termopar tipo K (Cromel-Alumel) y mantenida a través de un controlador de temperatura
- Cuando el metal hubo alcanzado la temperatura de trabajo, se permitió que este fluyera a través de la boquilla del distribuidor.
- Se alimentó aire al sistema de boquillas de atomización (el valor de la presión de aire, es específico para cada prueba y se midió con la ayuda de un manómetro colocado en la toma de alimentación de aire).
- El metal líquido es pulverizado a la salida del distribuidor debido a la presión de impacto ejercida por el aire.
- El medio de enfriamiento y la atmósfera en la cámara de atomización, es aire, lo que provoca la solidificación y el enfriamiento de las partículas.
- El polvo metálico se recolectó en el fondo de la cámara de atomización.

### 3.5 Caracterización del polvo metálico obtenido.

- Después de cada prueba, los polvos fueron almacenados para posteriormente ser analizados bajo estándares ASTM E 11 (Referencia 1) desarrolladas por la Organización Internacional de Estándares para así poder determinar el rendimiento.
- La caracterización del tamaño, se realizó con cribas de la serie Estándar U. S. cuyo número de mallas y su equivalencia en  $\mu\text{m}$  se mencionan a continuación:

No. malla	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
35.....	500
70.....	212
100.....	150
200.....	75
325.....	45
400.....	38
PAN.....	-38

- En la tamizadora se colocan las cribas elegidas, vertiendo sobre estas aproximadamente 150 g del polvo obtenido. Por efecto del movimiento de vibración de la máquina las partículas pasan a través de las distintas cribas de tal modo que las partículas más finas atraviesan finalmente la criba inferior, yendo a caer en el colector del fondo (PAN), mientras que las partículas de mayor tamaño van quedando retenidas en las cribas anteriores.

- El tiempo de cribado para cada prueba fue de 15 minutos.
- Se pesó el material contenido en cada malla y se realizó la tabulación del por ciento en peso retenido ( %wt ), es decir, la cantidad de material contenido en cada malla expresada en porcentaje; sin embargo, el resultado de un análisis de mallas se da frecuentemente en por ciento acumulado negativo (%Ac-), que se refiere a que por cada malla se da el porcentaje total de material que atraviesa dicha malla; obteniendo así la distribución del tamaño de partícula.
- Para caracterizar la forma de la partícula, primero se realizó en cada una de las mallas la toma de muestra mediante un cuarteo, utilizando para esto un cuarteador, con el fin de que dicha muestra fuese lo suficientemente representativa.
- Cada una de las muestras representativa de cada malla, se observó por microscopía óptica y con la ayuda de un ocular graduado, fue posible la medición de las dimensiones (longitud/diámetro) de cada una de las partículas.
- En cada muestra se observaron 50 partículas y se realizaron las tabulaciones correspondientes.
- El sistema entero pudo operarse con buena reproducibilidad, es decir, que al realizar pruebas bajo las mismas condiciones de operación, los resultados que se obtienen son semejantes.

**CAPITULO 4.**

**RESULTADOS.**

#### **4.1 Resultados obtenidos.**

Los resultados obtenidos de la atomización de aluminio utilizando aire como agente atomizador, son presentados principalmente como la distribución del tamaño de partícula en la cual el parámetro que afecta de manera directa incluso en el rendimiento es la presión de atomización.

En cuanto a la forma de la partícula, los resultados se muestran como una relación longitud-diámetro (promedio) para cada tamaño de partícula. Dicha relación indica la tendencia que tienen las partículas a ser esféricas respecto al tamaño de partícula y a la variación de la temperatura de trabajo (efecto del sobrecalentamiento ( $\Delta T$ ) del metal líquido).

##### **4.1.1 Tamaño de partícula.**

En cada una de las siguientes tablas, se reportan los datos experimentales obtenidos. En ellas están reportados los porcentajes de polvo de aluminio retenidas para cada tamaño de partícula, así como los porcentajes acumulados negativos, de tal modo que al ser calculados los rendimientos, los cuales también son mostrados, puedan estos ser comparados de acuerdo con el incremento de la presión de atomización.



El rendimiento se determinó en función a la cantidad de metal transformado en polvo, es decir, que sólo se consideraron las partículas con tamaños menores a 150  $\mu\text{m}$ , ya que partículas de tamaños mayores no son consideradas como polvo. Estas suelen ser recirculadas al proceso a partir de la fusión.

El rendimiento se calculo de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso de las fracciones menores a } 150 \mu\text{m}}{\text{Peso total de la muestra}} * 100$$

Tabla I

Temperatura de trabajo = 750 °C ; ( $\Delta T=90$  °C)

PRESIÓN	413 KPa		620 KPa		827 KPa	
TAMAÑO ( $\mu\text{m}$ )	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -
500	60.813	39.187	14.960	85.040	11.555	88.445
212	27.944	11.243	26.813	58.227	24.223	64.222
150	5.969	5.274	14.963	43.264	13.092	51.130
75	4.548	0.726	28.797	14.467	32.784	18.346
45	0.554	0.172	10.107	4.360	12.818	5.528
38	0.075	0.097	2.247	2.113	2.523	3.005
-38	0.093	---	2.108	---	3.001	---
<b>Rendimiento (a partir de -150<math>\mu\text{m}</math>)</b>	5.27 %		43.26 %		51.13 %	

Tabla II

Temperatura de trabajo = 800 °C ; ( $\Delta T=140$  °C)

PRESIÓN	413 KPa		620 KPa		827 KPa	
TAMAÑO ( $\mu\text{m}$ )	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -
500	56.782	43.218	24.066	75.934	15.522	84.478
212	31.740	11.478	27.998	47.936	26.565	57.913
150	6.105	5.373	14.204	33.732	15.749	42.164
75	4.512	0.861	23.316	10.416	28.417	13.747
45	0.639	0.222	7.680	2.736	9.931	3.816
38	0.093	0.129	1.329	1.407	1.806	2.010
-38	0.126	—	1.404	—	2.006	—
<b>Rendimiento (a partir de -150<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>5.37 %</b>		<b>33.73 %</b>		<b>42.16 %</b>	

Tabla III

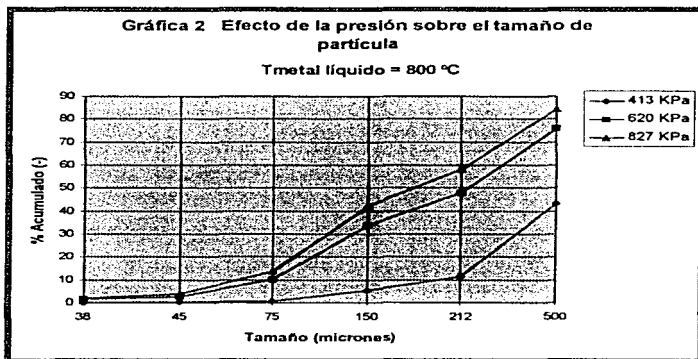
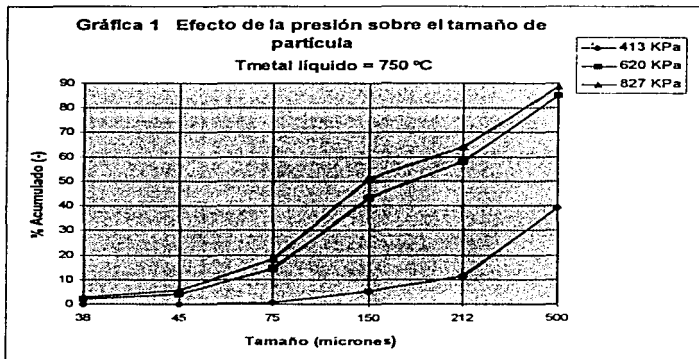
Temperatura de trabajo = 850 °C ; ( $\Delta T=190$  °C)

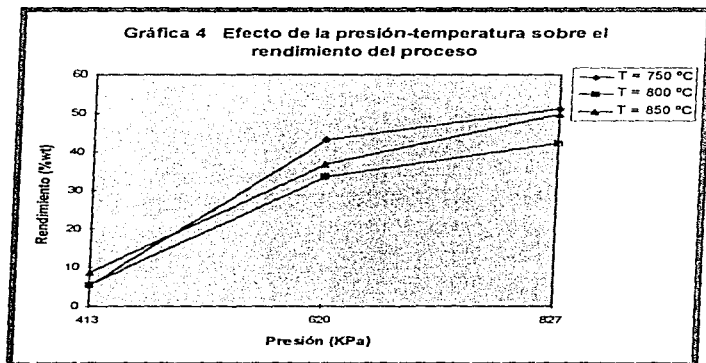
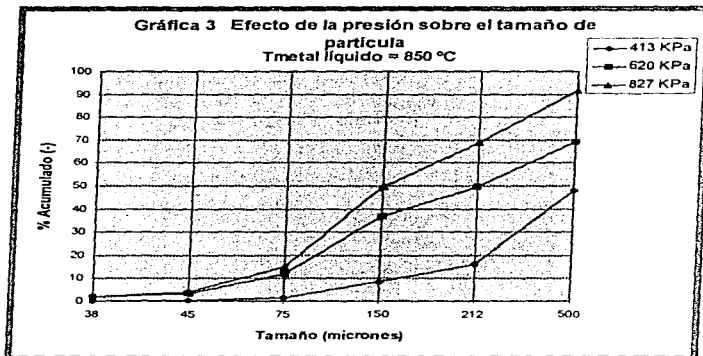
PRESIÓN	413 KPa		620 KPa		827 KPa	
TAMAÑO ( $\mu\text{m}$ )	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -	% wt ret	% Ac -
500	51.860	48.140	30.922	69.078	8.130	91.870
212	31.876	16.264	19.399	49.679	23.129	68.741
150	7.551	8.713	12.744	36.935	18.988	49.753
75	7.301	1.412	24.917	12.018	34.553	15.200
45	1.013	0.399	8.584	3.434	10.919	4.281
38	0.222	0.177	1.632	1.802	2.280	2.001
-38	0.174	—	1.798	—	1.998	—
<b>Rendimiento (a partir de -150<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>8.71 %</b>		<b>36.93 %</b>		<b>49.75 %</b>	

El efecto de la presión sobre el tamaño de partícula se muestra en las gráficas (1, 2 y 3) en las cuales se observa el Porcentaje acumulado negativo (%Ac-) Vs. Tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ ) para cada temperatura de trabajo y a distintos valores de presión.

En la gráfica 4 se observa el efecto de la presión del agente atomizador sobre el rendimiento (%wt de tamaños menores a  $150 \mu\text{m}$ ) a distintas temperaturas de trabajo.

En la figura 6 se presentan algunas de las formas y tamaños característicos del polvo de aluminio obtenido experimentalmente por atomización con aire.





## 4.1.2 Forma de la partícula.

Tras una serie de mediciones en las dimensiones (longitud y diámetro) de una muestra de 50 partículas metálicas de cada condición experimental, la forma de la partícula está representada cuantitativamente por la relación  $(L/D)$  promedio. Por lo que cada una de las siguientes tablas muestran la variación de la forma de la partícula metálica para cada tamaño, y el efecto que tiene la variación de la temperatura de trabajo ( $T_{fus.} + \Delta T$ ) sobre dicha forma de partícula.

Tabla IV

Presión de atomización = 413 KPa.			
TEMPERATURA	750 °C	800 °C	850 °C
TAMAÑO ( $\mu\text{m}$ )	$(L/D)$ prom.	$(L/D)$ prom.	$(L/D)$ prom.
500	3.069	3.902	2.546
212	2.667	2.724	2.353
150	2.003	2.627	2.320
75	1.591	1.738	2.139
45	2.093	2.176	2.173
38	2.108	2.400	2.714
-38	2.500	2.783	2.786

Tabla V

Presión de atomización = 620 KPa.			
TEMPERATURA	750 °C	800 °C	850 °C
TAMAÑO (μm)	(L/D)prom.	(L/D)prom.	(L/D)prom.
500	1.598	2.192	2.192
212	1.565	1.891	1.639
150	1.270	1.642	1.599
75	1.356	1.695	1.751
45	1.573	1.895	1.810
38	1.839	1.933	2.151
-38	2.238	2.602	2.226

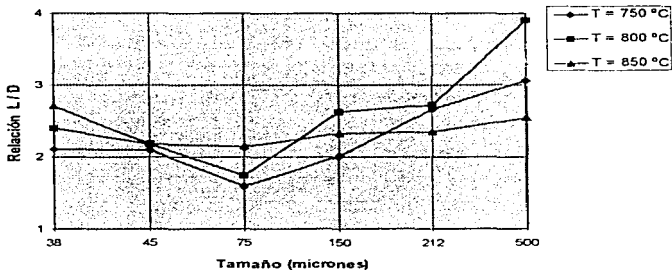
Tabla VI

Presión de atomización = 827 KPa.			
TEMPERATURA	750 °C	800 °C	850 °C
TAMAÑO (μm)	(L/D)prom.	(L/D)prom.	(L/D)prom.
500	2.152	2.237	1.881
212	1.689	1.898	1.639
150	1.371	1.545	1.563
75	1.257	1.666	1.684
45	1.701	1.892	3.252
38	1.829	1.999	3.573
-38	1.900	2.043	3.588

Las gráficas (5, 6 y 7) muestran, para cada valor de presión, la tendencia que tienen las partículas a ser esféricas, debido al efecto de la temperatura de vaciado del metal líquido. También muestran el efecto del tamaño de partícula sobre la forma de las mismas.

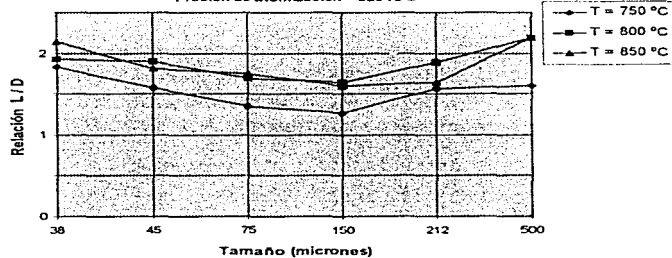
**Gráfica 5 Efecto del tamaño y la temperatura sobre la forma de la partícula**

Presión de atomización = 413 KPa

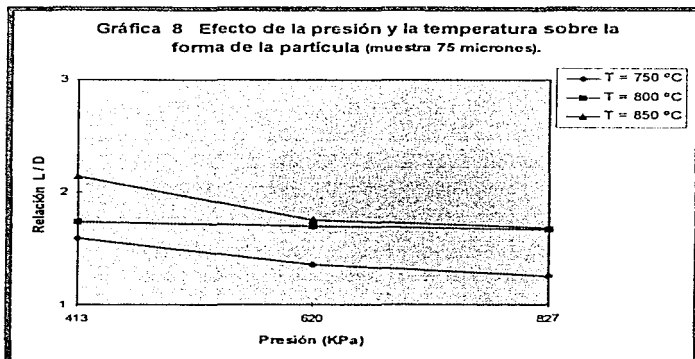
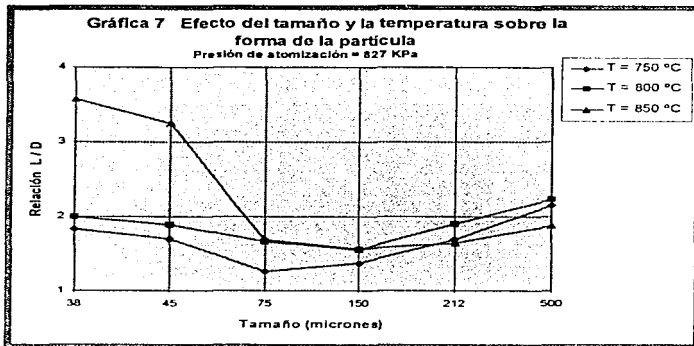


**Gráfica 6 Efecto del tamaño y la temperatura sobre la forma de la partícula.**

Presión de atomización = 620 KPa









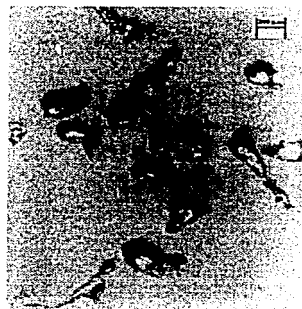
Fotografía 1. Temperatura= 750 °C ; Presión = 620 KPa  
Tamaño = 75  $\mu$ m



Fotografía 2. Temperatura= 800 °C , Presión = 413 KPa  
Tamaño = 75  $\mu$ m



Fotografía 3. Temperatura= 850 °C ; Presión = 1127 KPa  
Tamaño = 45  $\mu$ m



Fotografía 4. Temperatura= 750 °C , Presión = 620 KPa  
Tamaño = 150  $\mu$ m

FIGURA 6. Forma y tamaño de las partículas de aluminio observadas al estereoscópio a 32 X.

## **CAPITULO 5.**

### **ANALISIS DE RESULTADOS.**

Con el objeto de mostrar la influencia de los parámetros (presión y temperatura) sobre las características físicas (tamaño y forma) del polvo metálico obtenido experimentalmente por el proceso de atomización con aire, se realiza el siguiente análisis.

### **5.1 Efecto de la presión y la temperatura sobre el tamaño de partícula.**

El análisis del efecto de la presión de atomización sobre el tamaño de partícula (gráficas :1, 2 y 3) nos indica que la cantidad de partículas con tamaño que van desde 150 hasta 38  $\mu\text{m}$ , aumenta con el incremento de la presión del agente atomizador (aire), lo que es equivalente a decir que el tamaño de partícula decrece con el incremento de la presión de atomización (aire). Esto se puede observar en las tablas I, II y III, en las cuales se tienen reportados los rendimientos calculados para cada prueba.

En la gráfica 4, se ve claramente que al aumentar el valor de la presión de atomización, el rendimiento también se incrementa, como es el caso a 827 KPa, por el contrario, para presiones bajas (413 KPa.) el rendimiento que se obtiene es muy bajo debido a que la mayor cantidad de partículas que se obtienen a esta presión tiene un tamaño mayor a 150  $\mu\text{m}$ , haciendo esto que el proceso no sea rentable.

Por otro lado, en la gráfica 4, sería de esperarse que la temperatura tuviese un efecto relativamente marcado sobre el tamaño de partícula,

debido a que las propiedades del metal líquido cambian cuando la temperatura varía; sin embargo, esta variación en las propiedades del metal líquido también afectan la forma de las partículas, por lo que a ciertas temperaturas, las partículas metálicas, aunque tengan tamaños menores a 150  $\mu\text{m}$ , presentan formas irregulares, lo que dificulta la posibilidad de las partículas para atravesar las cribas o mallas de tamaños más finos. Por este motivo no se tienen valores precisos en cuanto al tamaño de partícula, afectando en forma directa a los rendimientos logrados experimentalmente, (en apariencia, no puede esclarecerse ningún tipo de tendencia provocada por el efecto de la temperatura del metal líquido).

## **5.2 Efecto de la presión y la temperatura en la forma de la partícula.**

En las gráficas (5, 6 y 7) se observa la variación en la forma de las partículas con respecto a cada tamaño, así como el efecto de la temperatura.

En la gráfica 8 se muestra el efecto de la presión sobre la forma de la partícula. El análisis se realizó para un tamaño de partícula más significativo o de mayor interés para el proceso. El tamaño elegido fue el correspondiente a la malla 200 (75  $\mu\text{m}$ ).

En general, es posible observar que la distribución de tamaños afecta en gran medida a la forma de las partículas, ya que para las partículas muy finas (38 y 45  $\mu\text{m}$ ), se tienen altos valores en la relación L/D, esto puede ser causado por la deformación que sufren las partículas al ser

impactadas por el agente atomizador aunado a la rapidez con la que es dispersado el calor, con lo que las partículas metálicas solidifican drásticamente antes de tomar una forma esférica. Así mismo, las partículas muy grandes (212 y 500  $\mu\text{m}$ ), también presentan resultados similares. Se piensa que las partículas alcanzan a tomar una forma esférica, sin embargo, en este caso la dispersión de calor es más lenta (debido a que la masa metálica es mayor) por lo que al no solidificar rápida y completamente las partículas se deforman por las colisiones dadas entre ellas mismas y por posibles choques con las paredes y el fondo de la cámara de atomización. Por último, para tamaños medios (75 y 150  $\mu\text{m}$ ), las relaciones  $L/D$  son las de menor valor, de tal modo que en la mayoría de los casos son los más próximos al valor mínimo que es 1. Es posible considerar que a estos tamaños, las partículas liberan el calor de tal modo que estas solidifican tomando una forma casi esférica.

En todos los casos, la temperatura de sobrecalentamiento juega un papel importante, ya que se observa que para un mismo tamaño de partícula, generalmente el valor de la relación  $L/D$  aumenta con el incremento de la temperatura de sobrecalentamiento, es decir, que para bajas temperaturas de sobrecalentamiento, se obtienen valores cercanos a 1. Esto se debe a que la tensión superficial del metal líquido es mayor a temperaturas cercanas al punto de fusión.

El efecto de la presión de atomización sobre la forma de la partícula, es significativo ya que considerando un tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$  a una misma temperatura, la relación  $L/D$  promedio disminuye ante el aumento en la presión de atomización (en la gráfica 8 se muestra que a

varias temperatura el efecto de la presión sobre la forma tiende a ser similar para este tamaño de partícula).

**CAPITULO 6.**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**



**6.1 Conclusiones.**

A partir de la construcción del equipo de atomización, y el desarrollo experimental del proceso de atomización con aire, el cual se llevo a cabo satisfactoriamente a nivel laboratorio, se pueden establecer los siguientes puntos:

1. El tamaño de partícula disminuye al aumentar la presión de atomización.
2. El tamaño de partícula es afectado por la temperatura de sobrecalentamiento del metal líquido (en este trabajo, el efecto de la temperatura , experimentalmente no queda bien definido).
3. La forma de la partícula está influenciada de manera determinante por la temperatura de sobrecalentamiento del metal líquido (A menor temperatura de sobrecalentamiento, la partícula tiende a ser esférica, esto puede verse cuando el valor de la relación  $L/D$  se acerca a 1, lo que representa la esferoidicidad de la partícula).
4. La forma de la partícula, es afectada directamente por el tamaño de partícula.
5. La forma de la partícula tiende a ser esférica al aumentar la presión de atomización.

6. El rendimiento del proceso, evaluando la cantidad de polvo producido experimentalmente ( tomando en cuenta el tamaño y la forma de la partícula ), depende en mayor medida de la presión del agente de atomización y en menor medida de la temperatura de sobrecalentamiento del metal líquido, por lo que el rendimiento es mayor cuando:

- Se aumenta la presión de atomización.
- El sobrecalentamiento del metal líquido es mínimo.

#### **6.2 Recomendaciones para trabajos posteriores.**

1. Realizar estudios más profundos sobre el diseño de los parámetros relacionados con los sistemas, (Sistema de alimentación, sistema de boquillas, sistema de atomización, sistema de enfriamiento, sistema de recolección, etc.). Así como desarrollar posibles modelos empíricos que predigan el comportamiento del proceso en general.
2. Estudiar el efecto que puede sustentar el uso de otros agentes atomizantes en el polvo metálico.
3. Estudiar las propiedades mecánicas que aporta el polvo metálico obtenido mediante este proceso.

Debido a que el diseño del equipo de atomización, aunque esta basado en los mismos principios, presenta condiciones de trabajo muy diferentes a las que se operan en la industria, por lo que cualquier modificación de los parámetros aportarían nuevos conocimientos para el área de atomización, así este tema esta abierto para próximos estudios no sólo a nivel licenciatura sino también a nivel maestría y doctorado.

**BIBLIOGRAFÍA.**

- 1 American Society of Metals; **Metals handbook; Powder metallurgy;** Vol. 7 Ninth Edition; Metals Park, Ohio; 1984.
- 2 Howard, A. Kuhn; **Powder metallurgy processing; New Techniques and Analyses;** Academic Press, New York; 1978.
- 3 Fritz, V. Lenel; **Powder metallurgy, principles and applications;** Metals Powder Industries Federation; Princeton, New Jersey; 1980.
- 4 Henry H. Hausner; **Handbook of powder metallurgy;** Second Edition; Chemical Publishing Co., Inc.; New York; 1982.
- 5 Metal Powder Industries Federation; **Powder metallurgy equipment manual;** Princeton, New Jersey; 1977.
- 6 George H. de Groat; **Tooling for metal powder parts;** First Edition; Mc Graw-Hill Book Company Inc.; New York; 1958.
- 7 Svarovsky, L.; **Powder testing guide: Methods of measuring the physical properties of bulk powders;** British Materials Handling Board; 1987.
- 8 Mc Dermott, John; **Powered metals technology;** Noyes Data Corp; Park Ridge, New Jersey; 1974.

- 9 Goetzel, G. Claus; **Treatise on powder metalurgy**; Volume 1; Interscience Publishers Inc.; New York; 1949.
- 10 Skaupy F., **Cerámica de los metales**; Reverté, S.A.; Barcelona, 1955.
- 11 J. Grandzol and J. A. Tallmadge, **The international journal of powder metallurgy and powder technology**; Volume 11, No. 1, January, 1975.
- 12 Lawley; **The international journal of powder metallurgy and powder technology**; Volume 13, No. 3, July, 1977.
- 13 A Verlag Schmid Publication; **Powder metallurgy international**; No. 1, January, 1992.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**