



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ATOMIZACIÓN CON GAS PARA METALES Y
ALEACIONES DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO
P R E S E N T A :
JOSÉ GUADALUPE RIVERA ORDOÑEZ



MÉXICO, D.F.

2006



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.

DEDICO EL PRESENTE TRABAJO

A DIOS quien me da la vida y los dones que poseo.

A MIS PADRES.

**FRANCISCA ORDOÑEZ MIRÓN
TOMÁS RIVERA SALAZAR**

**A ti mamá por tu amor, entrega y sacrificio que me
brindaste toda la vida.**

**A ti papá por ser el mayor ejemplo y el mejor modelo de
mi vida.**

A RAÚL por ser mi eterno compañero.

A OSCAR por ser el niño que vi crecer.

A DAVID por ser una motivación en mi vida

**A LA MEMORIA DE MI ABUELA
RAMOS MIRÓN CASTELÁN**

Tú eres el gran pilar de mi vida.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
quien me cobijo durante todo mi desarrollo profesional y donde forme
mis valores, principios y conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis.

Al Dr. Félix Sánchez y la Dra. Ana María Bolarín (UAEH) por sus consejos y atribuciones al presente trabajo.

A la M. en C. Ma. Eugenia Noguez, Dr. J. Bernardo Hernández e IQM Gerardo Arámburo por su tiempo y paciencia durante la revisión de esta tesis.

Al Dr. Francisco Garfías, IQM Ciro Márquez, IQ Rosa M. Unda, M. en I. Yolanda Guzmán, Dr. Joan Genesca, Dr. Carlos González, Dr. Fidel Reyes y Dr. José A. Barrera por todas las gratas experiencias profesionales durante el desarrollo de mi carrera.

Al Dr. Oscar Barceinas, M. en C. Liliana Vélez y Dr. Guillermo Frádes por su hospitalidad y apoyo durante mis estancias e intervenciones en Querétaro.

Al CIITEC-IPN por brindarme la oportunidad de continuar superándome profesionalmente.

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	4
2.1. Definición.....	5
2.2. Panorama de la metalurgia de polvos en México.....	6
2.3. ¿Por qué atomización con gas?.....	6
3. OBJETIVOS.....	8
4. ANTECEDENTES.....	10
4.1.Introducción.....	11
4.1.1. Metalurgia de polvos.....	11
4.1.2. Polvos Metálicos.....	11
4.1.3. Fabricación de polvos metálicos.....	11
4.1.4. Atomización.....	13
4.2. Descripción del proceso de atomización con gas.....	14
4.3. Características y propiedades de los polvos atomizados con gas.....	17
4.3.1. Tamaño de partícula, distribución de tamaños de partícula y forma.....	17
4.3.2. Morfología superficial, estructura interna y control microestructural de los polvos atomizados con gas.....	19
4.4. Modelos y mecanismos en la atomización con gas.....	20
4.5. Variables importantes en el proceso de atomización con gas..	22
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y MODELADO MATEMÁTICO.....	23
5.1. Caracterización del prototipo de atomización.....	24
5.1.1. Descripción del prototipo.....	24
5.1.2. Análisis aerodinámico.....	27
5.1.3. Prototipo de la cámara de atomización.....	28
5.2. Atomización de estaño.....	29
5.2.1. Línea de aire.....	29
5.2.2. Diseño y modelo.....	31
5.2.3. Diseño del sistema.....	38
5.2.4. Diseño de experimentos.....	39
5.2.5. Caracterización del polvo.....	40

6. RESULTADOS.....	41
6.1. Análisis aerodinámico.....	42
6.2. Atomización de estaño.....	42
6.2.1. Diseño y modelo.....	42
6.2.2. Diseño del sistema.....	49
6.2.3. Diseño de experimentos y caracterización del polvo.....	50
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
7.1. Diseño del sistema de atomización.....	58
7.2. Proceso de atomización.....	58
8. CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64
APÉNDICE A.....	67
APÉNDICE B.....	70
APÉNDICE C.....	73
APÉNDICE D.....	75
APÉNDICE E.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.	Principales etapas de la pulvimetalurgia.....	5
Fig 2.	Aplicación de los polvos metálicos como una función de su tamaño de partícula.....	12
Fig 3.	Principales técnicas de producción de polvos.....	12
Fig 4.	Principales procesos de atomización comercial.....	13
Fig 5.	Diseños de pulverizador.....	15
Fig 6.	Etapas de la atomización con gas y sus principales variables de proceso.....	16
Fig 7.	Configuraciones de los chorros para atomización.....	17
Fig 8.	Etapas en la desintegración de la corriente de metal líquido durante la atomización.....	20
Fig 9.	Atomizador de cortina confinada.....	24
Fig 10.	Prototipo experimental.....	24
Fig 11.	Tapa superior del atomizador.....	25
Fig 12.	Base del atomizador.....	26
Fig 13.	Análisis aerodinámico.....	28
Fig 14.	Cámara de atomización.....	29
Fig 15.	Esquema del crisol de metal líquido como volumen de control.	31
Fig 16.	Algoritmo de solución para la predicción de historias térmicas y dinámicas.....	38
Fig 17.	Información gráfica obtenida a partir del modelo propuesto para la atomización de estaño con gas ($\rho_g = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1040 \text{ J/kg.K}$, $k_g = \text{W/kg.K}$)	48
Fig 18.	Efecto de la presión de la línea de aire sobre el diámetro medio de partícula y la desviación estándar.....	51
Fig 19.	Efecto del flujo volumétrico de aire sobre el diámetro medio de partícula y la desviación estándar.....	52
Fig 20.	Efecto del sobrecalentamiento del metal fundido sobre el diámetro medio de partícula y la desviación estándar.....	53
Fig 21.	Morfologías obtenidas a partir de la experimentación.....	55
Fig 22.	Efecto de la presión de la línea de aire sobre la morfología de la partícula.....	55

Fig 23.	Efecto del flujo volumétrico de aire sobre la morfología de la partícula.....	56
Fig 24.	Efecto del sobrecalentamiento de metal fundido sobre la morfología de la partícula.....	56
Fig B1.	Principales variables que intervienen en la dinámica del aire.....	71
Fig D1.	Determinación de los parámetros morfológicos de las partículas.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Relación entre las variables de proceso y las propiedades que afectan en el propiedades.....	22
Tabla 2	Instrumentación en la experimentación.....	30
Tabla 3	Condiciones de la línea de aire durante la experimentación....	30
Tabla 4	Condiciones experimentales para la determinación de C_D	33
Tabla 5	Condiciones experimentales para la atomización de estaño....	39
Tabla 6	Ángulo de la cortina originado por el chorro de aire.....	42
Tabla 7	Determinación de C_D conforme a la ecuación 10.....	43
Tabla 8	Condiciones del aire en la tobera del atomizador obtenidas a partir del modelo de flujo isentrópico.....	43
Tabla 9	Predicción del diámetro medio de partícula a partir de la simulación.....	44
Tabla 10	Predicción de trayectorias de enfriamiento y determinación de las dimensiones finales de la cámara de atomización.....	49
Tabla 11	Distribución, diámetro medio de partícula y desviación estándar para cada ensayo experimental.....	50
	Propiedades termofísicas del estaño.....	74
	Propiedades termofísicas del aire.....	74

1. RESUMEN

Para la elaboración del presente trabajo, y con el fin de conocer las diferentes variables en el proceso de atomización con gas y sus efectos en la producción de polvo metálico, se llevó a cabo una extensa y detallada revisión bibliográfica. Conforme a lo anterior se reconocieron las etapas del proceso (dinámica del metal fundido, dinámica del gas, zona de atomización y solidificación de partículas) y se estudió cada una de ellas para la ejecución de una apropiada serie de experimentos, la cual permitió evaluar minuciosamente el efecto de las variables seleccionadas.

La tobera de atomización es un diseño previamente elaborado por el Dr. Arturo Juárez Hernández, por lo que la primera tarea consistió en estudiar el comportamiento aerodinámico del aire en la tobera a diferentes condiciones, para ello se construyó un sistema que permitió simular físicamente el proceso utilizando agua como líquido a atomizar y aire como fluido atomizante. El parámetro de interés fue la determinación del ángulo de la cortina que se produce por la geometría de la tobera de atomización y el impacto entre ambos fluidos; además se pudo corroborar el comportamiento de la fragmentación al variar las condiciones del aire (Presión).

Se diseñó y construyó un crisol que controló las condiciones del metal fundido durante la atomización; dicho recipiente fue construido con una fibra refractaria base alumina denominada *alucon*.

La predicción de la dinámica del aire, que a la postre llevó a la determinación del flujo másico, densidad, temperatura y velocidad inicial del gas, fue llevada a cabo considerando un flujo isentrópico en la trayectoria del gas desde el suministro hasta su paso por el anillo concéntrico del atomizador, conforme a lo sugerido por Lavernia(1996), Únal(1989) entre otros. De lo anterior se elaboró un modelo matemático el cual aproxima las condiciones del aire en la zona de fragmentación. En cuanto a la dinámica del metal fundido, se desarrolló un modelo de vaciado en el crisol, el cual aproxima el flujo másico medio y la velocidad media del caudal de metal líquido.

Se utilizó un modelo empírico para predecir el posible tamaño medio de partícula de acuerdo a la ecuación de Lubanska relacionando tanto las propiedades de los fluidos como los parámetros de la geometría de la cortina de atomización. Se modificó y aplicó un modelo matemático descrito por Lavernia y Wu(1996) considerando solidificación al equilibrio, donde se pretende predecir las historias térmica y dinámica de las partículas con el objeto de

determinar, junto con el ángulo de la cortina previamente obtenido, las dimensiones de la cámara colectora de polvo metálico.

Se procede a la construcción de la cámara colectora junto con los accesorios que permiten el sostén del prototipo de atomización en la parte superior del colector y una mirilla en uno de los costados con la finalidad de hacer un análisis videográfico del proceso; se construye también la línea de aire que lo conduce desde su fuente a condiciones específicas de equipo (compresor) hasta el prototipo de atomización.

Se diseña y realiza una serie de experimentos encaminados a conocer los efectos de las variables de procesos seleccionadas (flujo volumétrico y presión de línea de aire, y sobrecalentamiento del metal líquido) sobre algunas características de las partículas obtenidas (tamaño medio, desviación estándar y forma).

Los resultados experimentales mostraron una buena concordancia con los obtenidos del modelo matemático y en general se puede decir lo siguiente:

- El tamaño medio de partícula disminuye al incrementar la presión del aire, el flujo volumétrico del aire y el sobrecalentamiento del metal líquido.
- La desviación estándar, definida en la pulvimetalurgia por la ecuación (1), obtenida del análisis granulométrico disminuye con la minimización del tamaño medio de partícula.
- Las partículas tienden a esferoidizarse (la razón largo-diámetro de los polvos obtenidos tiende a ser igual a la unidad) conforme se disminuye el tamaño medio de partícula.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Definición.

La pulvimetalurgia o metalurgia de polvos, es una técnica de conformado de materiales (metálicos y no metálicos), caracterizada por la obtención del producto a partir de mezclas de polvos que son cohesionados y sinterizados (vía compactación – sinterización) figura 1; para ello se parte de la materia prima (que consiste en una cantidad suficiente de polvo metálico, cerámico o mezcla de ambos) que cuenta con características que dependen principalmente de la técnica con la cual fueron producidos; posteriormente se presenta la etapa de compactación en la cual se tratará de dar dimensiones determinantes a las piezas aplicando presión sobre los polvos en un molde o matriz, aprovechando la adhesión de las partículas u otros mecanismos de deformación; por último se tiene la sinterización, donde las piezas adquieren las propiedades finales por medio de un proceso a temperaturas superiores a la de recristalización, aquí se desarrollan las uniones entre partículas y se densificarán las piezas; en esta etapa es de igual importancia el enfriamiento, ya que este puede causar alteraciones considerables en la microestructura del producto⁽¹⁾. Además de estas etapas podrían presentarse algunas otras como calibrado y tratamientos térmicos posteriores a la sinterización entre otros. Las mencionadas inicialmente son la base de esta técnica. Todos estos procesos tienen como ventajas la alta productividad, bajo grado de contaminación, alta eficiencia de materia prima y control de la composición química y la microestructura del producto; pero también cuentan con algunas desventajas considerables como la alta inversión inicial que se requiere y la limitación geométrica de las piezas⁽¹⁻⁶⁾.

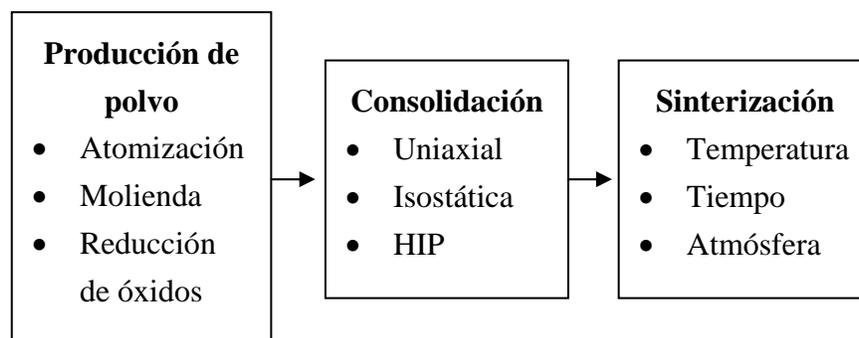


Figura 1. Principales etapas de la pulvimetalurgia

2.2. Panorama de la metalurgia de polvos en México.

En el ámbito latinoamericano, México es considerado un país de alta producción de materias primas minerales, producción de piezas metálicas semiterminadas y procesos de acabado; sin embargo, nuestro país no es pilar en el desarrollo de materiales especiales ni de sus procesos de obtención, además en algunos casos nos vemos en la necesidad de adquirir tecnología sin el interés de desarrollarla.

En general, la industria y la investigación tienden a encaminarse por rutas diferentes, y los intentos por dirigirse hacia intereses comunes no se concretan por falta de confianza de los inversionistas hacia los investigadores. En los últimos tiempos, y hablando específicamente del área que concierne a esta investigación, se han desarrollado eventos en los cuales se han tratado directamente estos problemas, y donde cada vez se da más aceptación a los compromisos industria - academia que tanto se requieren para un desarrollo propio; varios de estos gestos se han dado en los tres congresos nacionales de la pulvimetalurgia desarrollados en las instalaciones de CIATEQ en la ciudad de Querétaro, y es satisfactorio darse cuenta que los industriales se interesan más por ayudar a impulsar y desarrollar la tecnología que se necesita.

No obstante, por ahora México aún se encuentra en una situación con la que no cuenta con una tecnología propia en esta área, por lo es casi totalmente dependiente del mercado extranjero; además, aún no existe un vínculo fortalecido entre el sector industrial y de investigación, por lo que tampoco estamos en la situación de desarrollar ciencia y tecnología a corto plazo.

Este trabajo incide en este respecto al desarrollar tecnología propia para la producción de polvos metálicos a partir de los fundamentos del proceso.

2.3. ¿Por qué atomización con gas?

Al analizar los procesos de producción de polvos y elegir el que más adecuado a las posibilidades de experimentación, no fue complicado apreciar que los procesos de atomización con dos fluidos eran los más convenientes por la calidad y características de producto, además de la facilidad en la comprensión de sus principios junto con lo práctico del diseño del

prototipo experimental. Al principio se consideró más factible el agua como fluido atomizante, ya que las características de los polvos obtenidos y su alta eficiencia energética la hacen económicamente más atractiva con respecto a los producidos con algún gas como medio de atomización. Pero al tomar en cuenta la necesidad de controlar el grado de oxidación y minimizar el contenido de oxígeno en los polvos, con el agua como medio de atomización sería prácticamente imposible llevar a cabo dicho control. Así que éste es el seguimiento que llevó a la elección del estudio de la atomización con gas para alcanzar el objetivo.

Complementando lo anterior, se seleccionó al aire como gas de proceso por ventajas como la economía que representa trabajar con él, la información existente en la bibliografía y la baja reactividad en comparación con el agua, que pudiese tener frente a ciertos metales. Además, el presente trabajo aplica la información ensayando con estaño para que en futuros trabajos se enfoque al diseño del equipo para la atomización de aluminio y aleaciones base aluminio, con posiblemente otros gases como medios de atomización. El estaño posee un bajo punto de fusión, lo cual lo hace más fácil de maniobrar durante las etapas de fusión y vaciado en el proceso de atomización.

3. OBJETIVOS.

Objetivo general: Producir y caracterizar polvo de estaño en un atomizador de tobera.

Objetivos particulares:

- Llevar a cabo una evaluación física de la tobera prototipo de atomización.
- Determinar el ángulo de la cortina de aire generado por la tobera de atomización a partir de la experimentación con un modelo físico teniendo como medio atomizante aire y como fluido a atomizar agua, con el fin de llevar a cabo un buen diseño de la cámara colectora.
- Determinar la capacidad de la línea de aire con el fin de ajustar los valores de presión y flujo volumétrico permitidos por el equipo para la experimentación.
- Elaborar un modelo matemático que establezca las condiciones termofísicas y dinámicas del aire desde la tobera, del metal fundido desde el crisol y de las partículas dentro de la cámara de atomización
- Construir la cámara de atomización de estaño con aire a partir del estudio cuantitativo basado en el modelo desarrollado.
- Evaluar experimentalmente el proceso atomizando estaño con aire bajo las condiciones de proceso especificadas en el modelo matemático.
- Analizar los efectos de las variables de proceso sobre la distribución de tamaños de partícula y la morfología del producto obtenido.
- Comparar los datos experimentales y los obtenidos a partir del modelo matemático utilizado en las predicciones
- Determinar si dicho modelo es capaz de representar el comportamiento del proceso.

4. ANTECEDENTES.

4.1. Introducción

4.1.1. Metalurgia de polvos

La metalurgia de polvos (M/P) es uno de varios procesos de manufactura para la fabricación de partes, componentes o productos semiterminados. Existen muchos atributos del procesamiento de polvos los cuales hacen de la pulvimetalurgia una tecnología de manufactura multimodal. Metalúrgicamente hablando, todos los procesamientos modernos de polvos ofrecen flexibilidad en composición, minimizan la segregación de elementos aleantes y promueven el desarrollo de microestructuras finas. Una de las más importantes ventajas es el aprovechamiento de la materia prima, teniendo un alto nivel de utilización⁽²⁾.

La ruta consolidación - sinterización en M/P es un método económicamente efectivo a altos volúmenes de producción para la formación de partes de precisión con gran complejidad de forma teniendo énfasis en la calidad, estos procesos permiten el eficiente diseño de productos comerciales e industriales de cualquier metal o aleación⁽¹⁾.

M/P es también la llave para la elaboración de aleaciones con microestructuras y propiedades únicas, las cuales serían imposibles de obtener por colada o fundición. Un atributo crítico e intrínseco que favorece a la atomización de polvo es la solidificación rápida; con lo cual cualquier segregación es controlada, y en ocasiones evitada⁽²⁾.

4.1.2. Polvos Metálicos.

Dentro de ésta monografía, el término *polvos metálicos* define a las partículas de metales o aleaciones, usualmente dentro del rango de tamaño de 0.1 a 1000 μm ⁽²⁻⁶⁾. Los metales en un estado finamente dividido exhiben características y propiedades únicas, son de gran importancia económica y comercial en un amplio rango de aplicaciones industriales, incluyendo M/P. La figura 2 muestra algunos usos de los polvos metálicos en función de su tamaño de partícula.

4.1.3. Fabricación de polvos metálicos.

Todos los materiales pueden pulverizarse; el método de fabricación seleccionado depende de las propiedades del material y la economía del proceso. Cabe mencionar que siempre hay una correlación entre el modo de fabricación con el tamaño, forma, microestructura y química del

producto. Los polvos metálicos pueden ser producidos por una de las siguientes cuatro formas: química, electrolítica, mecánica y atomización⁽²⁻⁶⁾. La figura 3 muestra las técnicas más comunes que se involucran en cada uno de los casos ya mencionados.

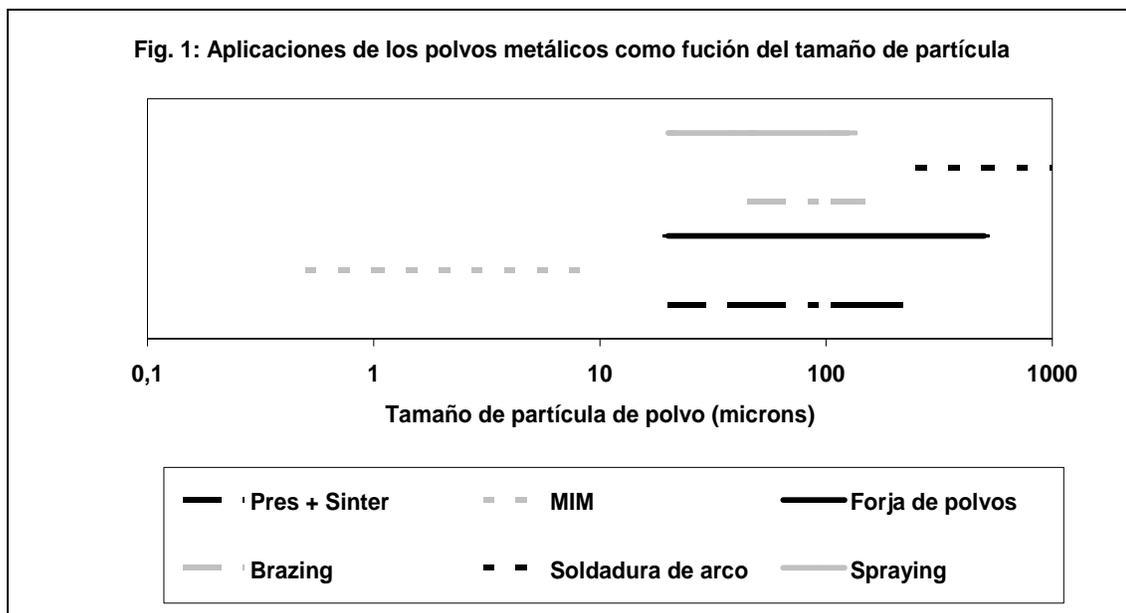


Figura 2. Aplicación de los polvos metálicos como una función de su tamaño de partícula. [2]

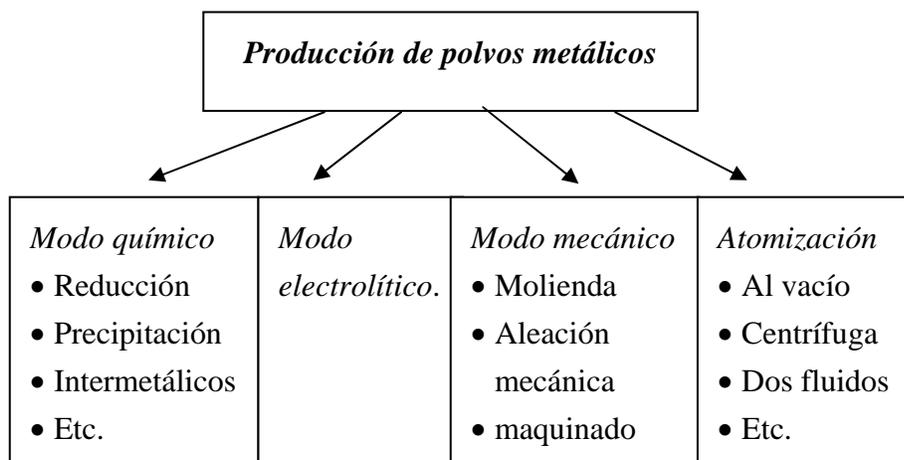


Figura 3. Principales técnicas de producción de polvos.

Inicialmente, los métodos mecánico, químico y electrolítico fueron dominantes. Ejemplos incluyen la trituración de polvo de cobre, la molienda de polvo de óxido de hierro reducido, la descomposición de sales de platino a partir de una solución seguida de molienda,

la reducción de precipitados de carbonato de cobre, y la reducción de óxido de tungsteno. El polvo de cobre electrolítico fue producido a partir de los años 1920's. Aproximadamente hasta 1965 la mayoría de los polvos de hierro en Norteamérica fueron hechos por reducción de óxidos o menas⁽²⁾.

4.1.4. Atomización.

La atomización es definida como la fragmentación de una masa de metal líquido en gotas finas, y su posterior solidificación da origen al polvo requerido⁽²⁾; por lo que cualquier material fundido puede ser atomizado. La fragmentación del metal líquido puede ser llevada a cabo por el impacto con una corriente de agua o gas (a), una fuerza centrífuga cedida por un cuerpo en movimiento circular (b), o un repentino traslado a una zona de mucho menor presión (c). Esquemas de estos procesos son presentados en la figura 4.

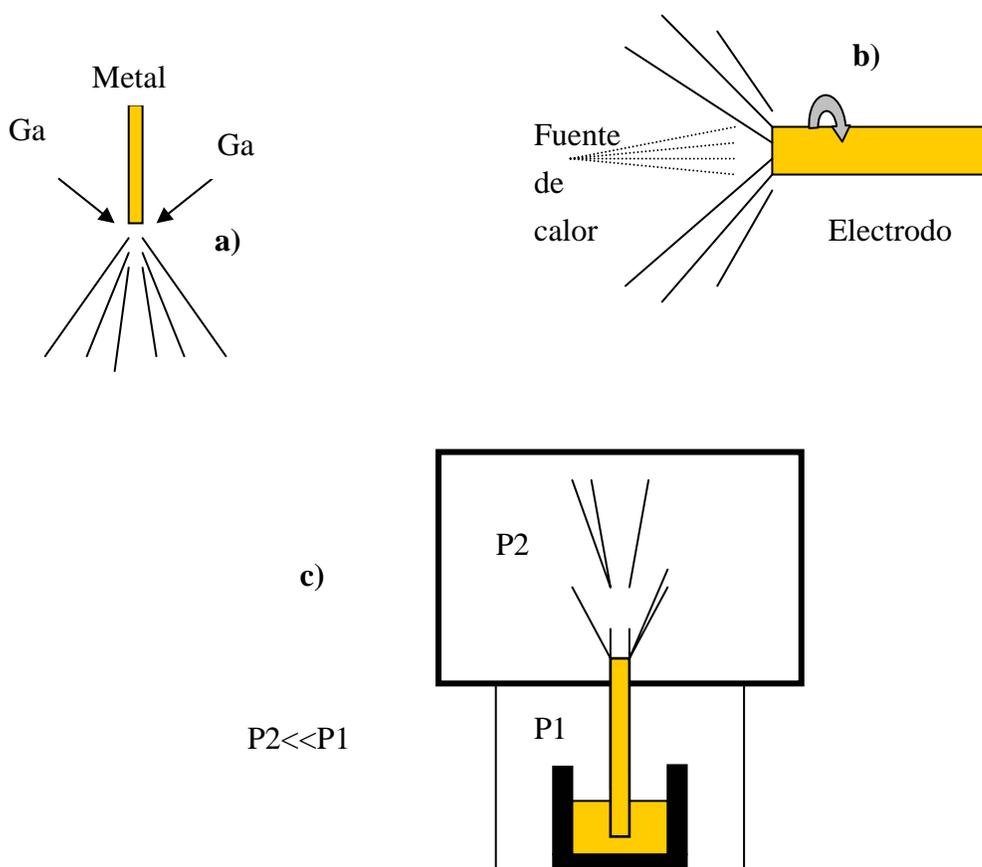


Figura 4. Principales procesos de atomización comercial; a) atomización de dos fluidos con agua o gas, b) atomización centrífuga, c) atomización al vacío.[2, 3]

En atomización, las gotas en su trayectoria experimentan enfriamiento convectivo, y si el tamaño de las gotas es menor a 500 μm prevalecen condiciones de solidificación rápida (SR) dando una microestructura fina en las partículas resultantes. Usualmente las gotas tienen una diferencia de temperatura significativa con sus alrededores y al mismo tiempo se trasladan a través de ese medio. El resultado es que la energía térmica es intercambiada entre las gotas con el medio, con el subsecuente enfriamiento y solidificación, mientras se mueven. Si la pérdida de calor es lo suficientemente rápida, las gotas pueden aún llegar a ser subenfriadas y el fenómeno de recalcancia puede presentarse cuando la fase cristalina nuclea en cualquier punto de la gota. En cualquier caso, la temperatura de la gota cambiará rápidamente con el tiempo^(2,3).

4.2. Descripción del proceso de atomización con gas.

La producción mundial de polvos metálicos atomizados con aire es próxima a las 250,000 toneladas por año, mientras que la producción de atomización con gas inerte es aproximadamente 60,000 toneladas al año. Para metales de alto punto de fusión, los lotes de producción procesan cantidades en el rango de 100 a 6000 kg; en el caso de metales de bajo punto de fusión, estos son procesados frecuentemente en forma continua⁽²⁾.

El diseño del atomizador es de gran importancia en las características del producto final. En la atomización con gas se utilizan dos arreglos básicos: de caída libre y confinado, figura 5. En la configuración de caída libre, la salida del gas toma la forma de toberas próximas y concéntricas a la corriente de metal fundido o como un anillo anular alrededor de dicha corriente. El diseño confinado es el más frecuentemente utilizado y consiste en una salida de gas en forma anular concéntrica a la corriente fundido junto a la base del crisol, lo cual provoca que el impacto sea a corta distancia y las pérdidas de energía por la expansión del gas sean mínimas.

El proceso de atomización involucra muchas variables repartidas, por lo general, en cuatro etapas tal y como lo muestra la figura 6. Estas variables incluyen parámetros específicos de proceso, y propiedades físicas y químicas de los fluidos involucrados. Además se requiere de una fuente de gas a alta presión y un ciclón separador de partículas con filtros (opcional); dependiendo el caso, el gas utilizado puede ser reciclado o descargado a la

atmósfera; generalmente este gas es el mismo con el que se purga la atmósfera de la cámara colectora y forma el medio de enfriamiento. Dicha cámara colectora comúnmente es hecha con acero inoxidable.

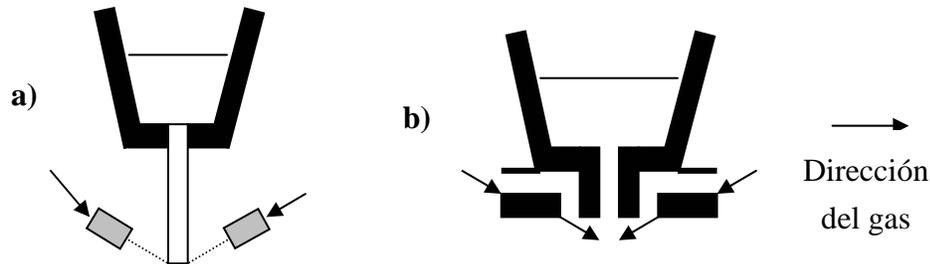


Figura 5. Diseños de pulverizador; a) en caída libre, b) confinada. [2, 3, 4]

Respecto al equipo de fusión, para metales poco reactivos, comúnmente se funde sin control de la atmósfera; en el caso de metales muy reactivos es usual fundirlos en un horno de inducción al vacío. Los diámetros de boquilla en la base del crisol, donde se origina el caudal de metal líquido, dependiendo de las características y propiedades del fundido, tienen un tamaño de 2 a 15 mm de diámetro⁽³⁾.

Los gases más comúnmente usados son el aire y el nitrógeno. Sí se requiere minimizar la contaminación en materiales reactivos se prefiere trabajar con argón; pero sí además de esto se requieren mayores velocidades de enfriamiento, se recomienda usar helio. También, por razones técnicas y económicas, es común el uso de mezclas gaseosas.

En procesos comerciales, la presión de gas está normalmente en el rango de 0.5 a 9 MPa; correspondiendo a flujos volumétricos de gas del orden de 0.02 a 0.24 m³/s. Las velocidades de gas dependen del diseño y van de 20 m/s hasta velocidades supersónicas (Mach 14). El sobrecalentamiento del metal líquido debe ser de 75 a 150° C⁽²⁾.

Los polvos obtenidos por estos procesos son generalmente esféricos o redondeados con superficies lisas. El diámetro medio de partícula (d_m) se encuentra en el rango de 50 a 300 μ m con una desviación estándar cercana a 2⁽²⁻⁶⁾.

La geometría del chorro de fluido esta asociada con la geometría y disposición de las toberas que suministran en forma controlada dicho fluido de atomización, en este caso aire⁽¹⁾.

Son diversos los diseños que han surgido como consecuencia de la necesidad de producir polvos metálicos en forma más eficiente y con propiedades específicas. Los diversos

diseños de toberas existentes pueden proporcionar chorros de gas como los que se muestran a continuación, figura 7.

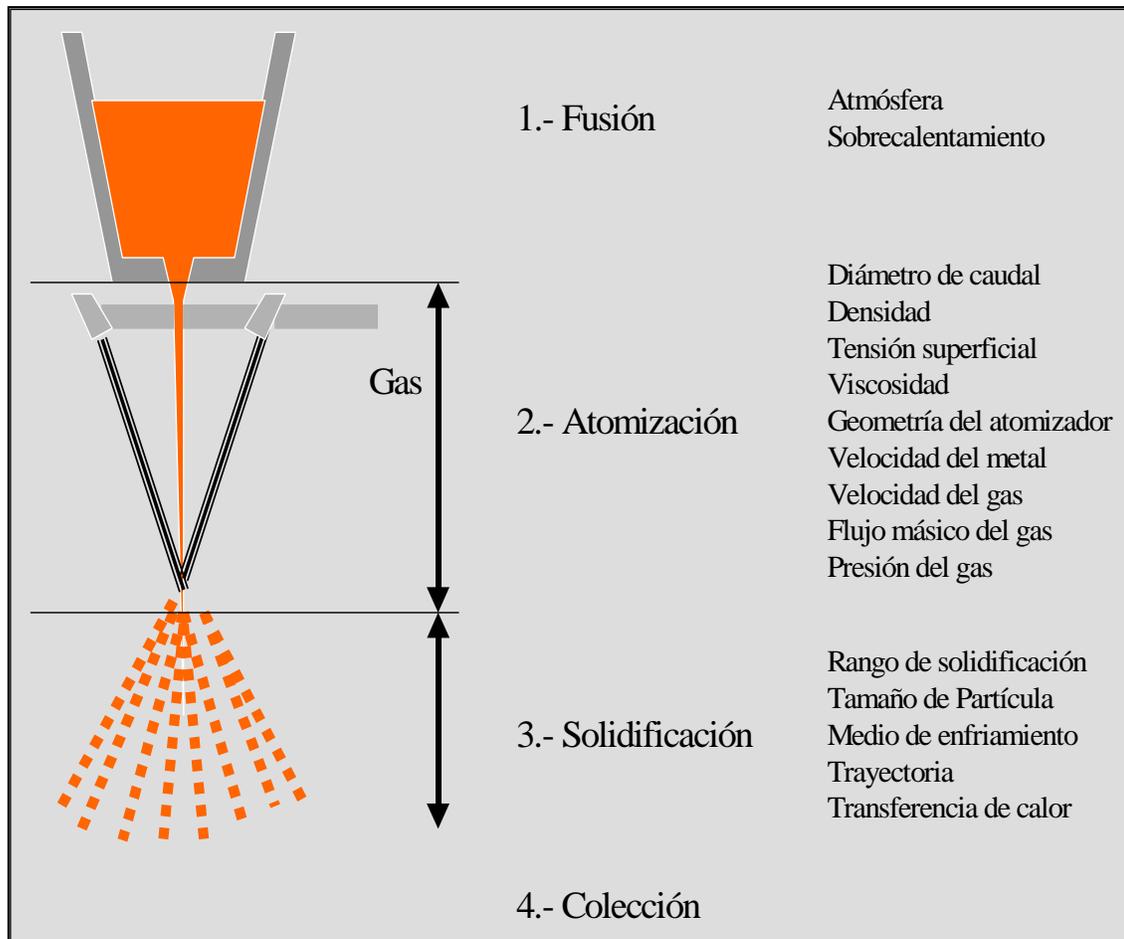
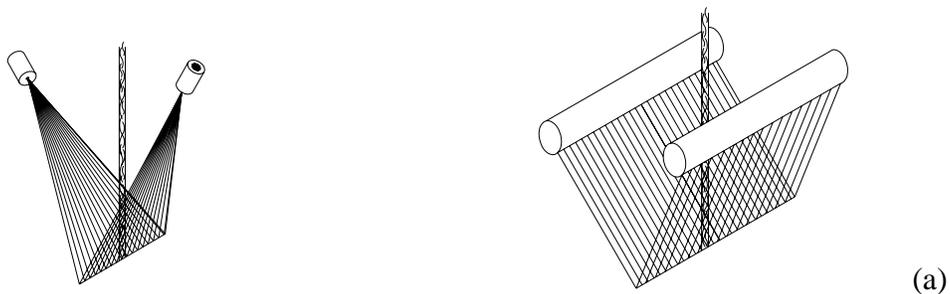


Figura 6. *Etapas de la atomización con gas y sus principales variables de proceso.* [2]



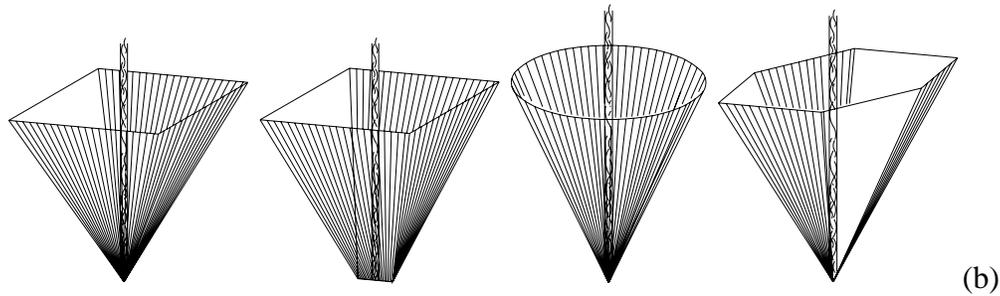


Figura 7. Configuraciones de los chorros para atomización. (a) Chorros V abiertos (b) Chorros V cerrados.[1]

En el presente estudio se trabajó con un chorro de aire V cerrado de forma cónica, figura 7b.

4.3. Características y propiedades de los polvos atomizados con gas.

4.3.1. Tamaño de partícula, distribución de tamaños de partícula y forma.

El tamaño de partícula y la distribución de tamaños de partículas son fácilmente cuantificables en términos de diámetro medio de partícula (d_m) y la desviación estándar (σ). Estas cantidades son determinadas a partir de curvas cumulativas de distribución de tamaños, consideradas sobre una base de peso. La mayoría de los polvos atomizados al cribarse exhiben una distribución Gaussiana de tamaños de partículas, y en una relación log - normal la curva es lineal^(2,3). El diámetro medio de partícula es aquel que corresponde con el 50% en peso acumulado en la curva antes descrita y la desviación estándar es definida en M/P por la siguiente relación.

$$\sigma = \frac{d_{(84\%)}}{d_{(50\%)}} = \frac{d_{(50\%)}}{d_{(16\%)}} \quad (1)$$

Existen muchas ecuaciones empíricas tratando de predecir d_m basándose en análisis dimensional y trabajo experimental, sin embargo, el determinar la distribución de tamaño de partícula es hasta ahora imposible. Lubanska derivó una ecuación que relaciona d_m con las

variables del metal y del sistema, basado en un estudio sobre atomización de hierro, acero y estaño usando aire comprimido en varios diseños de pulverizador. En forma adimensional, la forma de la ecuación de Lubanska⁽⁷⁾ es:

$$\frac{d_m}{D} = K \left[\left(\frac{v_m}{v_g We} \right) \left(1 + \frac{\dot{m}}{\dot{m}_g} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde d_m es el diámetro medio del polvo (m)

D es el diámetro de la corriente de fundido (m)

v_g es la viscosidad cinemática del gas (m²/s)

v_m es la viscosidad cinemática del metal líquido (m²/s)

$We^{(1)}$ es el número de Weber del gas

$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_g}$ es la razón de flujos máxicos de metal : gas (cada uno en kg/s)

K es una constante.

Esta ecuación tiene gran concordancia con resultados experimentales tal y como lo mostró su investigación. En otro trabajo similar Rao y Mehrota no pudieron ajustar sus resultados a la ecuación 2; pero concluyeron que K y el exponente del término de la derecha no son constantes, siendo la primera función de la temperatura de trabajo y la segunda de las condiciones geométricas del atomizador⁽⁸⁾.

En ausencia de efectos de impurezas y películas de capas de óxidos, la forma de las partículas es determinada por las magnitudes relativas de los tiempos de solidificación y esferoidización. Los modelos para ambos fenómenos, atribuidos a Nichiporenko⁽²⁾, son presentados en el Apéndice A. En atomización con gas casi siempre los tiempos de

¹ El número Weber es definido como la razón de las fuerzas inerciales entre la tensión superficial

$(\gamma_{l/g})$; es decir: $We = \frac{\rho_g d_m u_g^2}{\gamma_{l/g}}$. Donde ρ_g y u_g son la densidad y velocidad del gas

respectivamente.

solidificación son varios órdenes de magnitud mayores a los de esferoidización, por lo cual las partículas tienden a ser esféricas. Sí existen partículas en forma de ligamentos u ovaladas, la distorsión se le atribuye a la formación de capas (óxidos, nitruros, carburos, hidruros, etc.) en la superficie.

4.3.2. Morfología superficial, estructura interna y control microestructural de los polvos atomizados con gas.

Es muy importante relacionar la termodinámica con la cinética del proceso a partir de la manipulación de las variables del sistema para llegar a las microestructuras deseadas que proporcionarán las propiedades de las partes a fabricar.

La superficie de los polvos atomizados con gas es normalmente lisa y exhibe una morfología celular o dendrítica, reflejando el modo de solidificación de la gota⁽³⁾.

Cuando elementos reactivos son prealeados con el elemento base, alguna oxidación superficial puede ocurrir durante la atomización con gas (especialmente en aire), y como resultado de ello se presentan capas de óxidos generalmente en forma equiaxial sobre la superficie de las partículas.

La forma esférica y lisa de los polvos atomizados con gas limitan la resistencia de las piezas después de su compactación en frío. Además, al prealea los polvos antes de la atomización se incrementa la dureza y la resistencia con lo cual se reduce la compresibilidad. Estas limitaciones intrínsecas en los polvos atomizados con gas han estimulado el desarrollo de procesos de consolidación a altas temperaturas para llegar a elevadas densificaciones. Además de la morfología superficial, el estado y la química superficial del polvo influyen en su respuesta a la densificación. Estas consideraciones son de particular importancia para la pulvimetalurgia del aluminio y el magnesio, donde el control superficial es una prioridad en el área.

La *Porosidad Interna* es un fenómeno que puede presentarse en polvos atomizados con gas, la cual puede ser dañina en varias maneras. En general, la porosidad cerrada reduce la densidad tasada y genera cambios dimensionales no controlados durante la sinterización. Los casos más comunes se presentan cuando se atomizan superaleaciones con argón, el fenómeno que se presenta es llamado *porosidad inducida térmicamente* (TIP); independientemente de las condiciones de proceso, la porosidad incrementa con el tamaño de partícula y con la

disminución de la solubilidad del gas en el fundido⁽²⁾.

4.4. Modelos y mecanismos en la atomización con gas.

Los procesos de atomización con gas involucran simultáneamente los siguientes fenómenos y principios: compleja dinámica de fluidos, conservación de energía, transferencia de calor, cinética química y termodinámica. Las variaciones más importantes en los mecanismos de la atomización son atribuidas principalmente a la dinámica de fluidos.

A través de los años, se ha deseado descubrir los mecanismos en los cuales el caudal de metal es desintegrado para formar las gotas de fundido que al solidificar constituyen la masa de polvo metálico. A pesar de que las condiciones geométricas pueden variar ampliamente en la atomización con gas, se han propuesto los siguientes mecanismos básicos involucrados en la formación de las gotas⁽⁹⁾, figura 8:

- i. Formación de ondas a partir de la hoja metálica (caudal), las cuales rápidamente incrementan en amplitud.
- ii. Separación de las ondas metálicas para formar ligamentos individuales cuya longitud y diámetro dependen de la longitud de onda en la desintegración.
- iii. Fragmentación de los ligamentos en gotas esféricas.

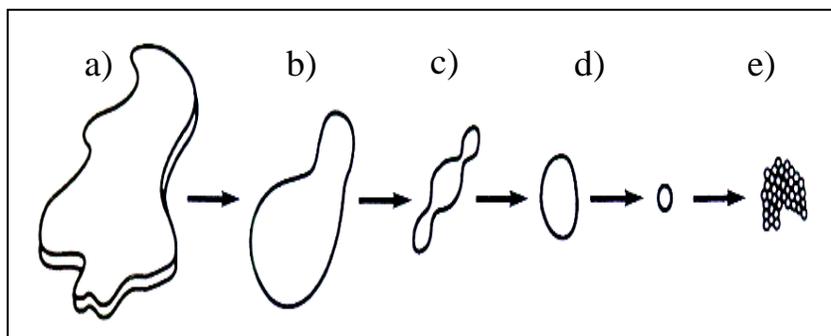


Figura 8. Etapas en la desintegración de la corriente de metal líquido durante la atomización; a) hojuela, b) elipsoide, c) ligamento, d) esferas, e) aglomerado. [2]

Los modelos que han sido propuestos para describir la formación de las gotas involucran un criterio de estabilidad donde se incluyen al número Weber, que refleja el efecto

de la tensión superficial del metal líquido. Ünal⁽¹⁰⁾ en sus trabajos está tratando de interpretar y modelar el papel del tipo de flujo, relacionado con el número Mach (Ma), en las características del producto, y junto con otros trabajos⁽¹¹⁾ se distinguen cuatro tipos de efectos en la zona de impacto del proceso dependiendo de las características del flujo.

- Flujo de gas subsónico ($Ma < 0.7$): El esfuerzo de corte sobre el caudal es débil permitiendo la formación de un cono metálico en la zona de impacto y de ligamentos bien definidos. Las partículas obtenidas son por lo general redondeadas o con forma alargadas exponiendo una superficie rugosa.
- Flujo de gas transónico ($0.7 < Ma < 1.2$): El metal líquido sufre un corte considerable reduciendo las dimensiones del cono metálico y los ligamentos formados. Las partículas tienden a ser esféricas o redondeadas con una textura superficial lisa.
- Flujo supersónico ($Ma > 1.2$): El caudal actúa en respuesta de un fenómeno de succión fuerte y presenta una desintegración instantánea en el orificio del crisol, la turbulencia es prácticamente nula en esta zona, por lo que la trayectoria de las partículas es bien definida; el corte del gas sobre el fundido es tan fuerte que puede llegar a tamaños de partícula próximos a $1 \mu\text{m}$. Las partículas son esféricas y la textura es totalmente lisa.
- Flujo con $Ma > 7$: Éste caso es similar al anterior, solo difiere en la microestructura resultante de las partículas; a partir de ésta velocidad se presentan estructuras amorfas por los altos subenfriamientos que se presentan.

Es importante concluir que la descripción analítica del tamaño de partícula resultante bajo condiciones específicas de proceso depende mucho del tratado matemático de los dos elementos más importantes en la atomización: el atomizador y el crisol, los cuales contienen y orientan a los fluidos que formarán el producto de proceso: el gas y el metal líquido respectivamente. Por lo tanto un estudio preciso y congruente de estas partes nos llevará a predicciones más exactas de las características del producto resultante; cabe mencionar que de estos dos elementos, el que es más difícil de describir es el gas en su traslado de la línea hasta la salida del atomizador, ello por el carácter compresible que posee.

4.5. Variables importantes en el proceso de atomización con gas.

Para una determinada composición de metal y un diseño fijo de atomizador, las variables que influyen en las características del polvo son: sobrecalentamiento del metal fundido, flujo de metal líquido, flujo de gas, velocidad de gas y las propiedades físicas y químicas del metal y el gas⁽¹¹⁾. La tabla 1 hace conexión de las características del polvo con las principales variables de proceso. Debido a las limitaciones de instrumentación y control, en el presente trabajo sólo se estudiará el efecto de algunas de estas variables.

Características de polvo	Variables de atomización
Tamaño medio de partícula	Flujo másico del metal
	Flujo másico del gas
	Velocidad de gas
	Sobrecalentamiento
	Propiedades del metal
Morfología	Propiedades del gas
	Velocidad de gas
	Sobrecalentamiento
	Propiedades del metal
Distribución de tamaño de partícula	Propiedades del gas
	Flujo másico del metal
Resistencia	Flujo másico del gas
	Flujo másico del metal
	Sobrecalentamiento

Tabla 1. Relación entre las variables de proceso y las propiedades que afectan en el producto. [15]

***5. DESARROLLO EXPERIMENTAL
Y MODELADO MATEMÁTICO.***

5.1. Caracterización del prototipo de atomización.

5.1.1. Descripción del prototipo.

El equipo utilizado consistió en una tobera de atomización anular de cortina confinada, el cual se presenta gráficamente en la figura 9.

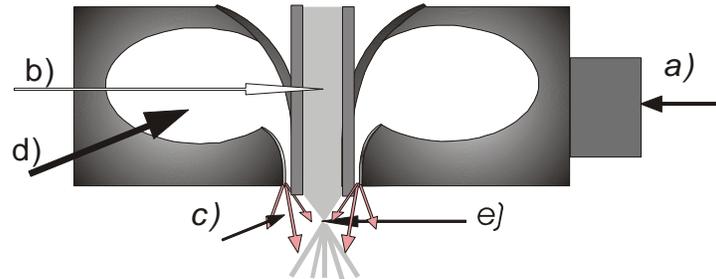


Figura 9. Atomizador de cortina confinada.

Como se puede observar en esta figura la entrada del gas (a) puede tener forma simple o tener varias entradas, el gas se recibe y comienza a circular en lo que es el cuerpo del atomizador (d), y una vez que se alcanza cierta presión el gas sale por lo que sería la boquilla de la tobera de atomización (c) formando un chorro de gas a una velocidad considerable; en la parte central del sistema se tiene al caudal del metal líquido (b), el cual, una vez cruzando el sistema será recibido por el gas en expansión que proviene del chorro antes mencionado, y será fragmentado en ligamentos los cuales debido a la tensión superficial tenderán a descomponerse en gotas esféricas antes de que se presente su solidificación, figura 8.

El prototipo (figura 10) fue construido con un acero grado herramienta, y por lo tanto puede soportar presiones muy altas ($\gg 1$ MPa).

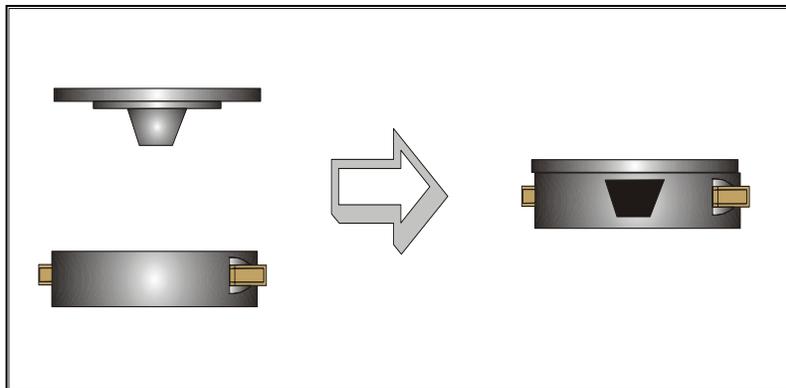


Figura 10. Prototipo experimental.

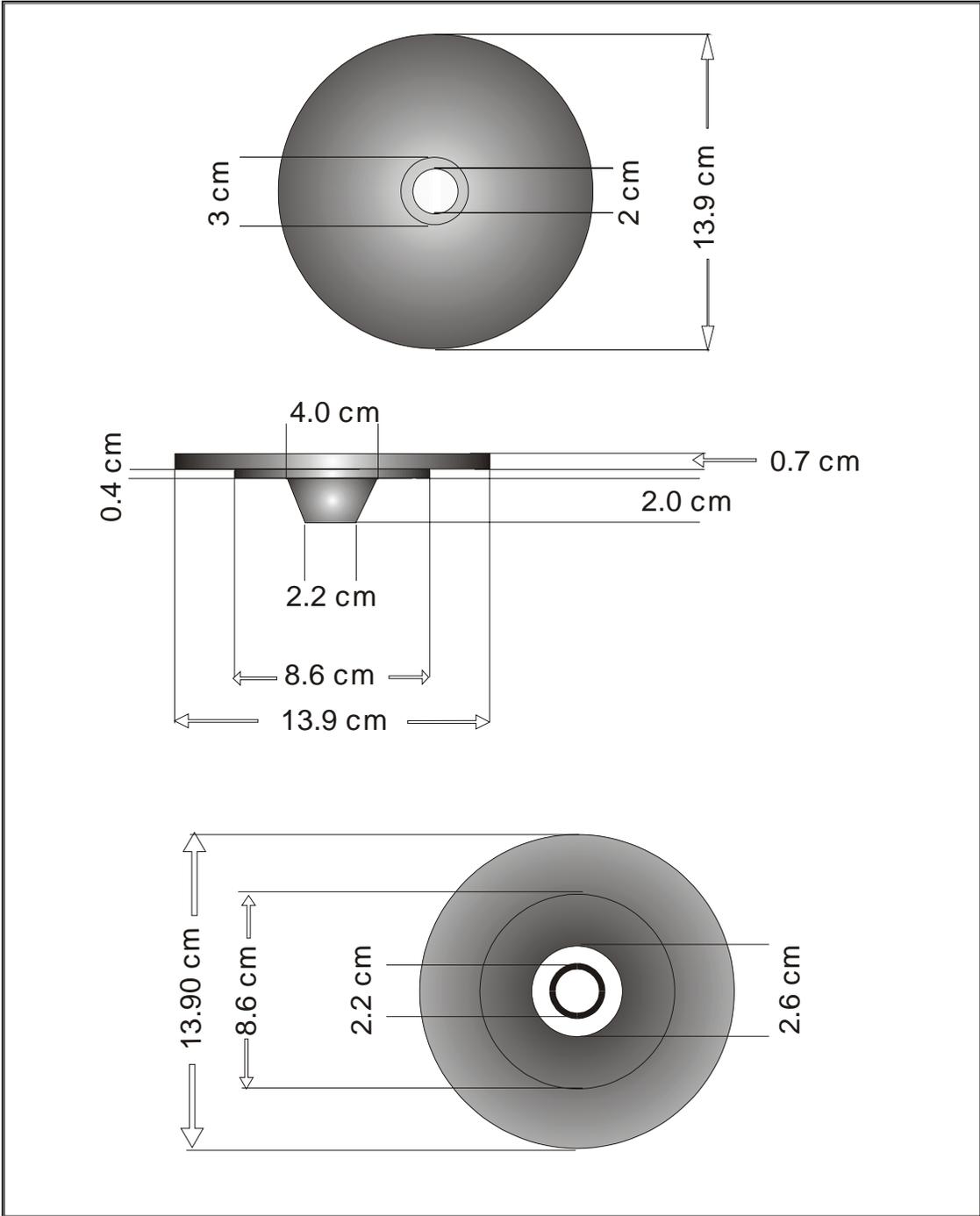


Figura 11. Tapa superior del atomizador

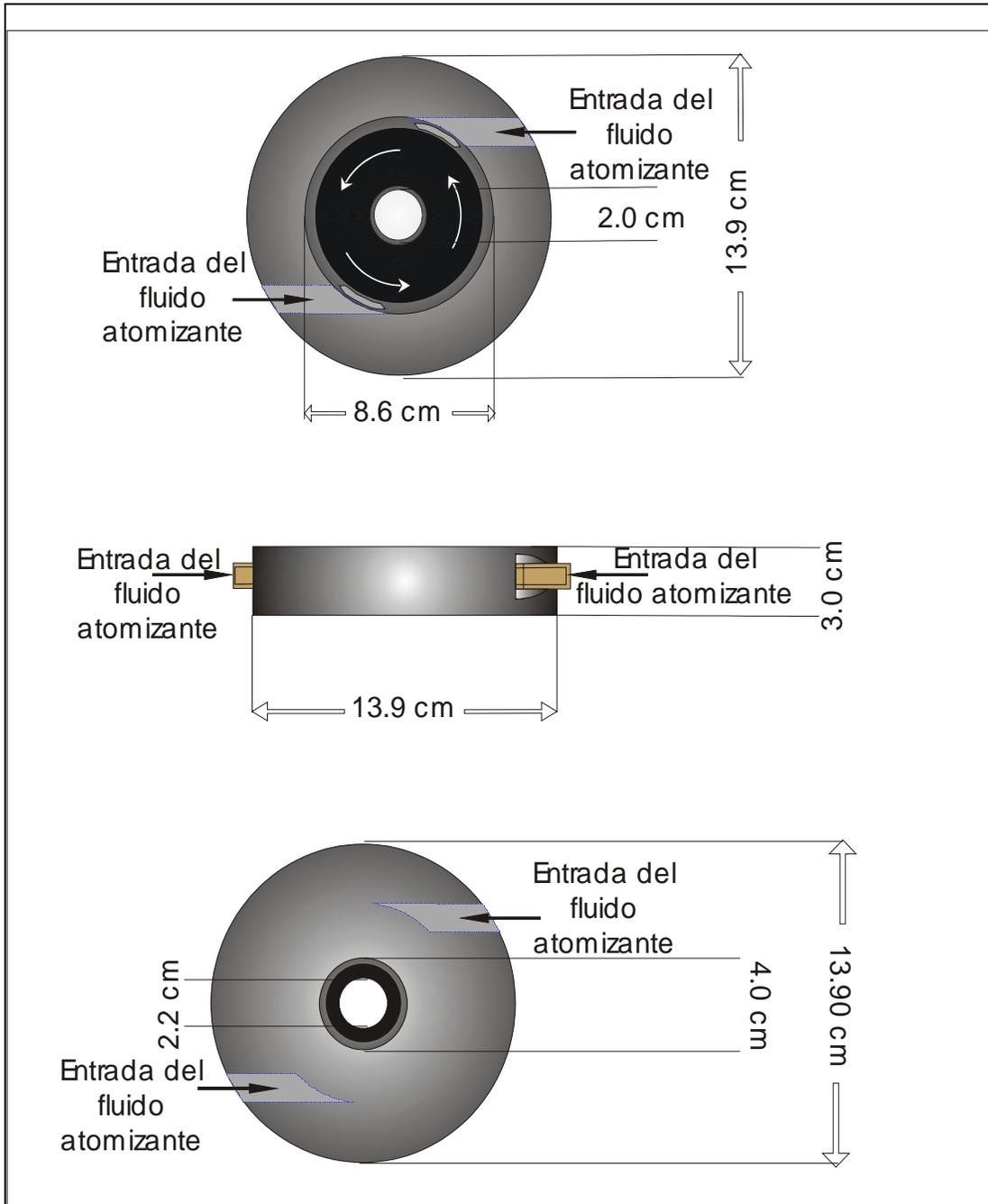


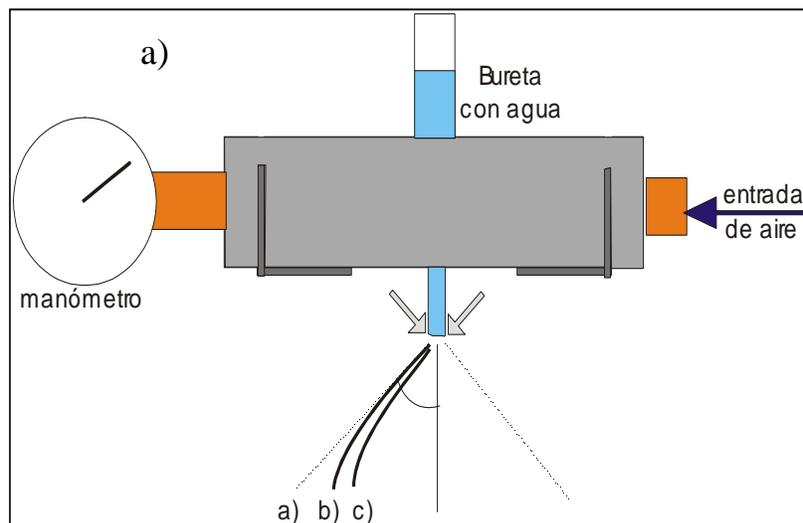
Figura 12. Base del atomizador

5.1.2. Análisis aerodinámico.

La finalidad de estudiar el comportamiento aerodinámico del sistema de atomización a partir de un modelo físico es conocer los aspectos geométricos de la cortina de atomización, así como los posibles efectos de las variables de proceso.

La siguiente prueba es recomendada por la empresa A.S.L. (Atomising Systems Limited), en ella se utiliza agua para modelar físicamente la atomización: Esta prueba es en general analizada de forma fotográfica o videográfica y tiene como objetivo evaluar las variaciones del ángulo de la cortina formada por el choque de ambos fluidos (el atomizante y el líquido a atomizar) y las inestabilidades presentes al cambiar las condiciones del proceso, y con ello tener una perspectiva real respecto al diseño, optimización y fabricación de la cámara colectora. Conforme a lo anterior, se construyó una estructura metálica que permitió apreciar de una forma apropiada la evolución del proceso, simulado con agua como se ha mencionado

En un caso muy particular, se llevaron a cabo estas evaluaciones para apreciar la variación del ángulo de la cortina con respecto a la presión. Las propiedades termofísicas del agua, en especial su baja densidad en comparación con los metales fundidos, permitieron marcar límites para la optimización de la cámara contenedora; es decir, el ángulo proyectado de la atomización del agua (figura 13 a, trayectoria a) debe ser mayor al que se da durante la atomización de metales fundidos (figura 13 a, trayectorias b y c), por ello, el ángulo máximo (α en la figura 14) obtenido en esta prueba es el que se consideró para la construcción de la cámara de atomización. El siguiente esquema representa la forma en la cual fue armado el sistema para la determinación de los ángulos de cortina y la forma como se determinó.



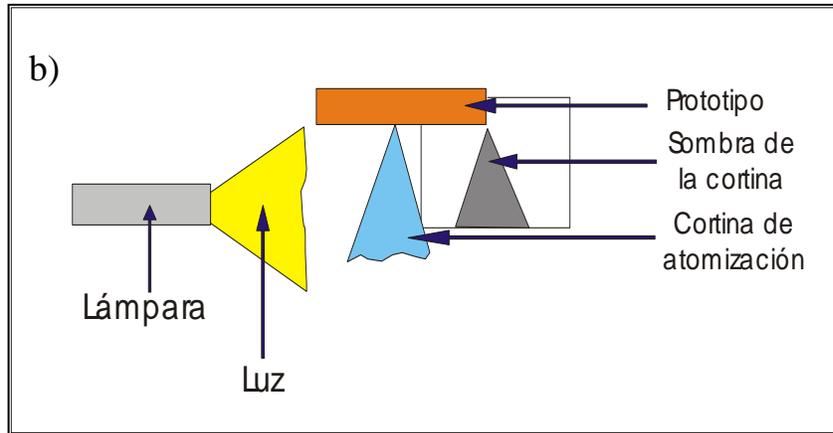


Figura 13. (a) Sistema, (b) principio para la determinación del ángulo de la cortina, (c) experimentación y (d) resultado.

5.1.3. Prototipo de la cámara de atomización.

En base a lo presentado previamente, se planteó la geometría de la cámara de atomización, figura 14, cuyas dimensiones dependerán del análisis numérico para la atomización de estaño descrito en los siguientes capítulos.

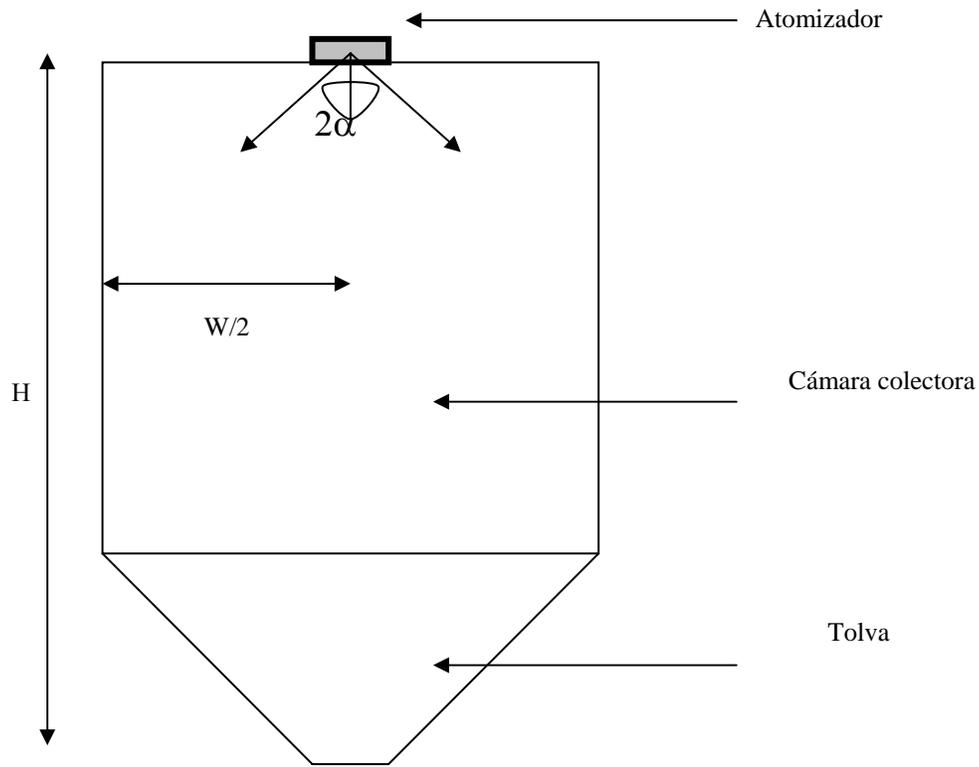


Figura 14. *Cámara de atomización*

5.2. Atomización de estaño.

5.2.1. Línea de aire.

La línea corresponde a una instalación para aire de 3/8 de pulgada de diámetro, la cual parte de un compresor POWERMATE® (fuente de aire a alta presión) hasta el atomizador. Dentro de nuestro sistema de flujo de aire contamos con la instrumentación para determinar las siguientes variables: temperatura, presión y flujo volumétrico. Los instrumentos son listados en la tabla 2 junto con los rangos de trabajo que poseen.

VARIABLE	INSTRUMENTO	RANGO DE TRABAJO
Temperatura	Termopar K	-150 – 1100° C
Presión	Manómetro de la línea	239 – 756 kPa (20 – 95 psig)
Flujo volumétrico	Rotametro Cole-Parmer	14 – 140 l/min

Tabla 2. *Instrumentación en la experimentación*

La velocidad del aire en la línea se obtiene dividiendo el flujo volumétrico del diámetro de la línea.

Los parámetros de experimentación permitidos por el equipo durante la atomización de estaño se muestran a continuación.

Presión, kPa (psig)	Flujo volumétrico, (l/min)	Velocidad en la línea m/s
515 (60)	125	29
653 (80)	140	33
756 (95)	192	45

Tabla 3. *Condiciones de la línea de aire durante la experimentación.*

Las condiciones más críticas en las cuales se somete el aire se presentan en el compresor; su temperatura mínima es de 275 K, su presión máxima de 928 kPa (120 psig) y su volumen es de 0.1022 m³ (27 Gal.). Un parámetro importante es la velocidad del sonido local, ya que éste determina el régimen dinámico en el cual se encuentra el aire en dichos puntos; su valor mínimo se da en las condiciones dentro del compresor (326.6 m/s) y su máximo en condiciones ambientales (345 m/s). Está reportado^(10, 15) que la dinámica del aire en este tipo de sistemas se comporta como un flujo isentrópico; el tratamiento matemático depende de los parámetros medidos en la experimentación (tres variables) y de ahí se desprende la

caracterización del aire en cada punto a partir del modelo, la formulación empleada para el presente trabajo es mostrada en el Apéndice B.

5.2.2. Diseño y modelo.

El estudio analítico del proceso se llevó a cabo en cuatro etapas: obtención del coeficiente de descarga del crisol, variación del estado de la corriente gaseosa con respecto a su flujo y presión, predicción del diámetro medio de partícula, y simulación del comportamiento térmico y dinámico de las partículas en el proceso; el primero comprende el análisis dinámico del fluido a ser atomizado, el segundo punto estudia la trayectoria de la corriente gaseosa y los dos últimos involucran las características de la atomización propiamente hablando.

Como primer paso se describió el crisol de trabajo a través del siguiente esquema, el cual se muestra en la figura 15.

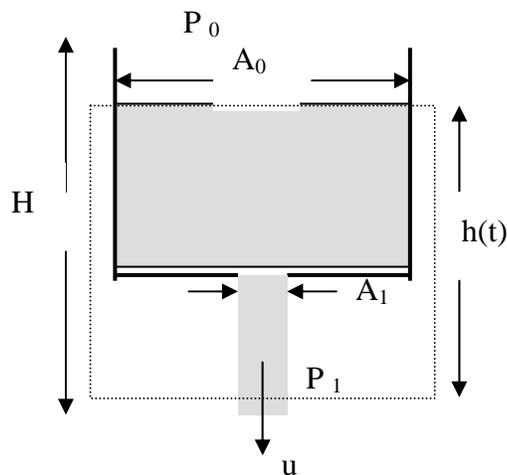


Figura 15. Esquema del crisol de metal líquido como volumen de control.

donde:

A_0 : área interna del crisol.

A_1 : área de la boquilla del crisol y del caudal de metal.

$h(t)$: altura del metal fundido en el crisol al tiempo t .

H : altura del metal fundido al inicio del proceso.

P_0 : presión sobre el metal fundido.

P_1 : presión sobre el caudal en la boquilla.

u : velocidad del caudal en el fondo del crisol.

El área punteada delimita el volumen de control para el estudio; como primer punto se aplican los balances correspondientes a la descarga del crisol que a la postre ayudarán a obtener el coeficiente de descarga del crisol (C_D) y el flujo másico del metal líquido \dot{w} .

I. *Coeficiente de descarga del crisol y flujo másico del metal líquido.*

El modelo propuesto para la obtención del coeficiente de descarga del crisol es el que a continuación se presenta:

- Balance de energía (ecuación de Bernoulli):

$$-\frac{u^2}{2} + gh(t) = 0 \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, despejando u de (3):

$$u = \sqrt{2gh(t)} \quad (4)$$

- Balance de masa (ecuación de continuidad):

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{w} \quad (5)$$

donde m es la masa del metal fundido dentro del crisol, t es el tiempo y \dot{w} es el flujo másico del caudal de salida del crisol; de acuerdo a las condiciones geométricas y cinéticas del prototipo se describen los términos de la ecuación (5) como sigue:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_m A_0 \frac{dh(t)}{dt} \quad (6 a)$$

$$\dot{w} = C_D \rho_m A_1 u \quad (6 b)$$

Incorporando las expresiones anteriores en (5) e incursionando el resultado de (4) tenemos:

$$A_0 \frac{dh(t)}{dt} = -C_D A_1 \sqrt{2gh(t)} \quad (7)$$

La ecuación anterior se resuelve al separar variables e integrando.

$$\int_H^0 \frac{dh(t)}{\sqrt{2gh(t)}} = -C_D \left[\frac{A_1}{A_0} \int_0^{t_1} dt \right] \quad (8)$$

donde t_v es el tiempo total de vaciado. El resultado de la integración es el siguiente:

$$t_v = \frac{A_0}{C_D A_1} \left[\sqrt{\frac{2H}{g}} \right] \quad (9)$$

Para un flujo ideal (sin fricción ni distorsiones de flujo entre fluido y recipiente) el valor de C_D es la unidad; así que para obtener el valor real de C_D del crisol, y siguiendo el análisis anterior para el caso ideal y para el caso experimental, se debe evaluar el cociente entre el tiempo de vaciado de la ecuación (9) con C_D igual a 1 (t_{vi}) y el tiempo de vaciado experimental (t_{vr}).

$$C_D = \frac{t_{vi}}{t_{vr}} \quad (10)$$

Para obtener experimentalmente el valor de C_D se utilizó agua como fluido a atomizar y aire como medio de atomización; el crisol se elaboró con alucón (fibra refractaria) el cual fue sinterizado a 800° C, la geometría del prototipo consiste en dos cilindros, el primero siendo el cuerpo del crisol, tiene un diámetro de 6.5 cm, y el segundo es la bajada del crisol con un diámetro de 0.4 cm. Las condiciones de evaluación se presentan en la tabla 4.

H(m) =	0.09
Ao(m ²) =	0.0033183
A1(m ²) =	0.0000126
g(m/s ²) =	9.8

Tabla 4. Condiciones experimentales para la determinación de C_d .

Como se puede apreciar, las pruebas se llevaron a cabo por caída libre desde el crisol; se considera que las presiones, tanto en el tope del crisol como en la boquilla del crisol son iguales (presión atmosférica).

Para la determinación del flujo másico se consideró que la variación de presión entre la superficie superior al baño líquido en el crisol (P_0) y la boquilla del crisol (P_1) es despreciable;

por lo tanto resolviendo la ecuación (8) con las condiciones $h(0)=H$ y $h(t)=h$ obtenemos la siguiente expresión:

$$\sqrt{2gh(t)} = \sqrt{2gH} - \frac{gC_D A_1}{A_0} t \quad (11)$$

Incorporando este resultado en la ecuación (6 b), tenemos:

$$\dot{w} = C_D \rho_m A_1 \left[\sqrt{2gH} - \frac{gC_D A_1}{A_0} t \right] \quad (12)$$

Aplicando el teorema de valor medio a la expresión anterior con los límites en el tiempo desde *cero* hasta t_v , resulta la expresión del flujo másico medio.

$$\bar{w} = \frac{C_D \rho_m A_1}{2} \left[\sqrt{2gH} \right] \quad (13)$$

II. Determinación del flujo másico y velocidad del gas.

Con respecto al modelado de la dinámica del aire dentro de éste tipo de tobera, Lavernia⁽¹⁵⁾ y colaboradores sugieren su estudio en base al modelo de flujo isentrópico de gas⁽¹⁴⁾; el cual es desarrollado en el Apéndice B para obtener las ecuaciones que predicen el flujo másico $\left(\dot{m}_g \right)$ y la velocidad en la boquilla del atomizador (u_e) . Las ecuaciones son las que a continuación se presentan.

$$\dot{m}_g = \frac{P_o \dot{V}_o M_g}{RT_o} \quad (14)$$

$$u_e = M_e c_e \quad (15)$$

donde:

P_o : presión del gas en la línea.

\dot{V}_o : flujo volumétrico del gas.

M_g : peso molecular del gas.

R : constante universal de los gases.

T_o : temperatura del gas en la línea.

M_e : Número Mach en la boquilla del atomizador.

c_e : velocidad del sonido en la boquilla del atomizador.

III. Determinación del diámetro medio de partícula.

El diámetro medio de partícula fue determinado por la ecuación (2), la cual involucra los parámetros termofísicos del aire y del estaño líquido (Apéndice C), considerando lotes de 250 gramos de fundido para cada condición experimental.

IV. Análisis dinámico y térmico de las partículas.

Velocidades del gas y las partículas.

La literatura indica que la velocidad del gas (u_g) decae de forma exponencial con respecto a la distancia (z) desde el atomizador. Aproximadamente este comportamiento se puede expresar con la siguiente función.

$$u_g = u_{gi} e^{-\frac{z}{\lambda_u}} \quad (16)$$

donde u_{gi} es la velocidad inicial del gas a la salida del atomizador, y el coeficiente de decaimiento λ_u está dado por la siguiente expresión.

$$\lambda_u = 3.04 \times 10^{-4} u_{gi} \quad (17)$$

La velocidad de una gota en un campo de gas puede ser calculada a partir de la segunda ley de Newton (fuerza = masa \times aceleración). Acorde a ello, existen tres fuerzas independientes en la dinámica de las partículas: la fuerza gravitacional (F_g), la fuerza de arrastre de fluido (F_d) y la fuerza boyante (F_b). Estas tres fuerzas son combinadas dentro de la segunda ley de Newton como sigue:

$$m_d \frac{du_d}{dt} = F_g + F_d - F_b \quad (18)$$

donde m_d es la masa de la partícula, u_d es la velocidad de la partícula y t es el tiempo. Cada

una de las fuerzas son representadas mediante las siguientes expresiones.

$$F_g = m_g g \quad F_d = \frac{A_d}{8} C_d \rho_g (u_g - u_d) |u_g - u_d| \quad F_b = \frac{\rho_g}{\rho_d} m_d g$$

donde g es la aceleración de la gravedad, A_d es el área superficial de la gota, C_d es el coeficiente de arrastre, ρ_g es la densidad del gas de atomización y ρ_d es la densidad de la partícula metálica. A partir de ésta información se puede generar una ecuación diferencial para la velocidad de la partícula de la forma siguiente:

$$\frac{du_d}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_d}\right) g + C_d \frac{3\rho_g}{4d\rho_d} (u_g - u_d) |u_g - u_d| \quad (19)$$

donde d es el diámetro medio de las partículas, el coeficiente de arrastre es una función del número de Reynolds, Re , y es dada por:

$$C_d = 0.28 + \frac{6\sqrt{Re} + 21}{Re} \quad (20)$$

recordando que el numero de Reynolds es una función de la velocidad relativa entre la partícula y el gas expresada de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho_g |u_g - u_d| d}{\mu_g} \quad (21)$$

donde μ_g es la viscosidad del gas.

Transferencia de Calor.

Debido a que a diámetros de partículas menores a 0.5 mm se presentan condiciones de enfriamiento newtoniano y por lo tanto los gradientes térmicos presentes en el interior de la partícula son despreciables siendo la convección con el aire de atomización la única forma de extracción de calor, el modelo presentado en este trabajo es basado en dicho principio; por lo que para una partícula esférica el balance de calor queda expresado de la siguiente forma:

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{6h(T - T_0)}{\rho_d C p_d d} \quad (22)$$

donde T_d es la temperatura de la partícula, h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, T_0 es la temperatura del gas y $C p_d$ es el calor específico de la partícula. Algunos

autores^(24, 25) afirman que, para este proceso, el coeficiente de transferencia de calor es una función del número de Reynolds de la partícula y el número de Prandtl (**Pr**) del gas, la cual es de la forma:

$$h = \frac{k_g}{d} \left[2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \right] \quad (23)$$

$$\text{con } \text{Pr} = \frac{Cp_g \mu_g}{k_g}$$

donde k_g es la conductividad térmica del gas, Cp_g es el calor específico del gas y μ_g es la viscosidad del gas.

Se consideran las propiedades termofísicas de la partícula como constantes para este análisis.

Solidificación de las partículas.

Para los metales puros algunos autores recomiendan^(36, 37) que la solidificación sólo se vincule con el desprendimiento de calor latente (ΔH_f) que se genera por el cambio de fase, ya que de esta manera se tiene buena aproximación con un proceso real; por lo tanto, el balance de energía queda establecido de esta forma.

Para la solidificación de una partícula esférica:

$$\frac{df}{dt} = \frac{6h(T_m - T_0)}{\rho_d \Delta H_f d} \quad (24)$$

donde f es la fracción sólida y T_m es la temperatura de fusión de la partícula. El coeficiente de transferencia de calor se calcula de la misma manera que en el enfriamiento de la partícula.

Diagrama de flujo.

En base al análisis presentado, donde se obtienen los parámetros de diseño de la cámara colectora y de proceso, se elaboró un programa de cómputo en lenguaje TURBO PASCAL 7.0 cuyo algoritmo de cálculo queda representado en el diagrama de flujo presentado en la figura 16.

5.2.3. Diseño del sistema.

Utilizando como parámetros de diseño las variables presentadas en 5.1.3. y basado en el análisis presentado en 5.2. se procede a calcular las dimensiones de la cámara de atomización. La temperatura máxima a la cual se evita la sinterización de las partículas es cercana a la temperatura de recristalización del material, la cual para estaño se consideró como 150°C ; por ello, la distancia máxima de todas las predicciones a la cual se alcanza esta temperatura desde la colada del metal hacia el sistema de atomización, es la referencia junto con el ángulo de la cortina de aire para la determinación de las dimensiones de la cámara colectora (altura H, y ancho W). El modelo de flujo isentrópico de aire fue resuelto aplicando el método de Newton⁽¹²⁾ (Apéndice B), y el modelo térmico y dinámico se resolvió aplicando el método de Runge-Kutta⁽¹²⁾ a las ecuaciones 19 y 22 o 24 de la sección anterior; dicho algoritmo se resolvió en lenguaje de programación TURBO PASCAL 7.0⁽¹³⁾.

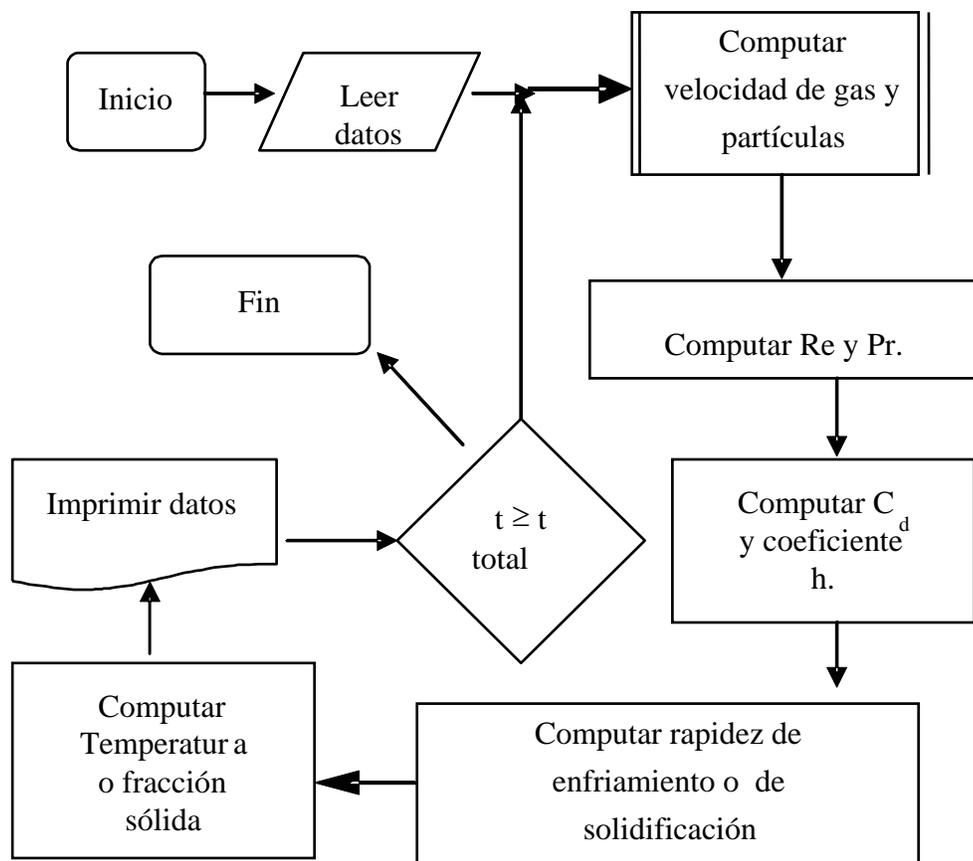


Figura 16. Algoritmo de solución para la predicción de las historias térmicas y dinámicas.

5.2.4. Diseño de experimentos.

Una vez construida la cámara de atomización se llevarán a cabo la serie de experimentos en base a la combinación de condiciones en la línea de aire propuestas en 5.2.1. y sobrecalentamientos de metal de 50, 100 y 150° C. La tabla 5 presenta el arreglo de la serie experimental para la atomización de estaño.

No. de experimento	Presión de línea, kPa (psig)	Flujo volumétrico de línea, l/min	Sobrecalentamiento, K
1	515 (60)	140	50
2	515 (60)	140	100
3	515 (60)	140	150
4	653 (80)	125	50
5	653 (80)	140	50
6	653 (80)	140	100
7	653 (80)	192	50
8	756 (95)	140	50

Tabla 5. Condiciones experimentales para la atomización de estaño.

La experimentación se llevó a cabo utilizando estaño electrolítico 99.99% de pureza. Las muestras fueron fundidas en hornos intermitentes y sus temperaturas verificadas con un termopar tipo K; una vez fundido, se trabajó con 20° C más al sobrecalentamiento para que compensará la pérdida de calor manifestada durante su traslado del horno al crisol de atomización y se vertiera el metal líquido justamente a la temperatura de sobrecalentamiento requerida. El metal fundido se alimentó controladamente a la zona donde se impactó con el aire, formando el producto pulvurento, el cual fue recolectado para su caracterización. Previo a cada corrida se verificaron las condiciones de la línea de aire con los instrumentos descritos anteriormente. Siempre, las variables de proceso controladas fueron la presión y flujo volumétrico del aire, y el sobrecalentamiento del metal fundido.

5.2.5. Caracterización del polvo.

Se determinó en este trabajo la distribución de tamaños de partícula por medio del tamizado de muestras de 100 g de polvo obtenido en cada una de las corridas experimentales en un RO-TAP W.S. Tyler RX-29 por un tiempo de 10 minutos; a partir de dicha clasificación se obtuvo el diámetro medio de partícula graficando el acumulado negativo de cada muestra. Se realizó un estudio morfológico para apreciar las variaciones en la forma de la partícula con respecto a los cambios en las condiciones experimentales, el parámetro de comparación fue la razón largo-diámetro de los polvos obtenidos conforme a lo descrito por Tallmadge; este análisis se llevó a cabo en muestras tomadas aleatoriamente de 50 partículas en cada experimento con tamaños entre 600 y 355 μm (malla -30 +45) para visualizar el efecto de las variables de proceso sobre la morfología de las partículas (ver apéndice D). Este estudio se realizó en un estereoscopio Olympus SZ-PT con ayuda de una interfase que transmitió los datos a una computadora, y aquí la captura de las imágenes obtenidas.

6. RESULTADOS.

6.1. Análisis aerodinámico.

En base al comportamiento observado en un ensayo preliminar se propusieron los siguientes parámetros.

- Fluido atomizante: aire.
- Fluido a atomizar: agua.
- Temperatura de trabajo: temperatura ambiente
- Presión de trabajo: 515, 584 y 653 kPa (60, 70 y 80 psi).

La tabla 6 pone en manifiesto los resultados obtenidos de estos ensayos, los cuales se ejecutaron sólo considerando la presión, ya que es el parámetro controlante de la línea de aire.

No. de ensayo	Presión, kPa (psi)	Ángulo de la cortina de aire, °
1	515 (60)	24
2	584 (70)	25
3	653 (80)	25

Tabla 6. *Ángulo de la cortina originado por el chorro de aire.*

6.2. Atomización de estaño.

6.2.1. Diseño y modelo.

I. *Coefficiente de descarga del crisol y flujo másico del metal líquido.*

Conforme a la ecuación (10), se presentan en la tabla 7 los resultados del ensayo con agua para la obtención del coeficiente de descarga del crisol.

No. Prueba	tiempo vaciado (s)
1	36
2	35.5
3	36
4	35.8
5	35.8
Promedio	35.82

tiempo de vaciado ideal	35.79
Cd =	0.999162479

Tabla 7. Determinación de C_D conforme a la ecuación 10.

En todas las corridas experimentales de atomización de estaño se incorporan 250 g de metal a través del crisol, por lo que el valor del flujo másico fue el mismo para cada caso con un valor de 0.0119 kg/s, con un tiempo de vaciado aproximado de 21.0 seg. y una velocidad de caudal de 0.135 m/s, de acuerdo a la sección 5.2.2.

II. Determinación del flujo másico y velocidad del gas.

Los valores de las características del gas a la salida de la tobera se muestran en la siguiente tabla para cada combinación de variables en la línea de aire a partir del análisis descrito en las ecuaciones 14 y 15, y el Apéndice B.

	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Te (K)	286.85	286.85	286.85	286.74
ue (m/s)	107.45	107.45	107.45	95.04
Pe (psig)	55.44	55.44	55.44	75.44
ρ_e (g/l)	5.84	5.84	5.84	7.51
m (kg/s)	0.0143	0.0143	0.0143	0.0162
	Exp.5	Exp.6	Exp.7	Exp.8
Te (K)	285.32	285.32	271.95	286.85
ue (m/s)	107.50	107.50	155.69	107.45
Pe (psig)	74.18	74.18	67.67	88.30
ρ_e (g/l)	7.44	7.44	7.24	8.58
m (kg/s)	0.0182	0.0182	0.0256	0.0209

Tabla 8. Condiciones del aire en la tobera del atomizador obtenidas a partir del modelo de flujo isentrópico.

III. Predicción del diámetro medio de partícula.

Los valores propuestos de presión y flujo de gas junto con los sobrecalentamientos considerados para la simulación (los mismos para la experimentación) se presentan en la siguiente tabla junto con los resultados obtenidos de diámetro medio de partícula que se obtuvieron a partir de las propiedades termofísicas del gas y el metal fundido (presentadas en el Apéndice C), los flujo máxicos obtenidos en 6.2.1.I y 6.2.1.II, y la ecuación 4:

No. de experimento	Po, kPa (psig)	Vo, l/min	ΔT , ° C	d_m , μm
1	515 (60)	140	50	335
2	515 (60)	140	100	320
3	515 (60)	140	150	307
4	653 (80)	125	50	369
5	653 (80)	140	50	319
6	653 (80)	140	100	304
7	653 (80)	192	50	207
8	756 (95)	140	50	311

Tabla 9. Predicción del diámetro medio de partícula a partir de la simulación.

IV. Cálculo del comportamiento dinámico y térmico de las partículas.

Como primer punto se validó el modelo comparando los resultados adquiridos de la simulación con los reportados en otros trabajos^(24, 25); la similitud de la comparación valida el modelo. un ejemplo de validación, se muestra a continuación con el resultado gráfico obtenido a partir de este modelo para una partícula de estaño puro teniendo un diámetro de 50 μm , una velocidad inicial de 5 m/s, un sobrecalentamiento de 100° C y una velocidad inicial de gas de 35 m/s, figuras 17a - 17h. Los comportamientos representados concuerdan con la literatura y son útiles como un primer acercamiento al proceso real.

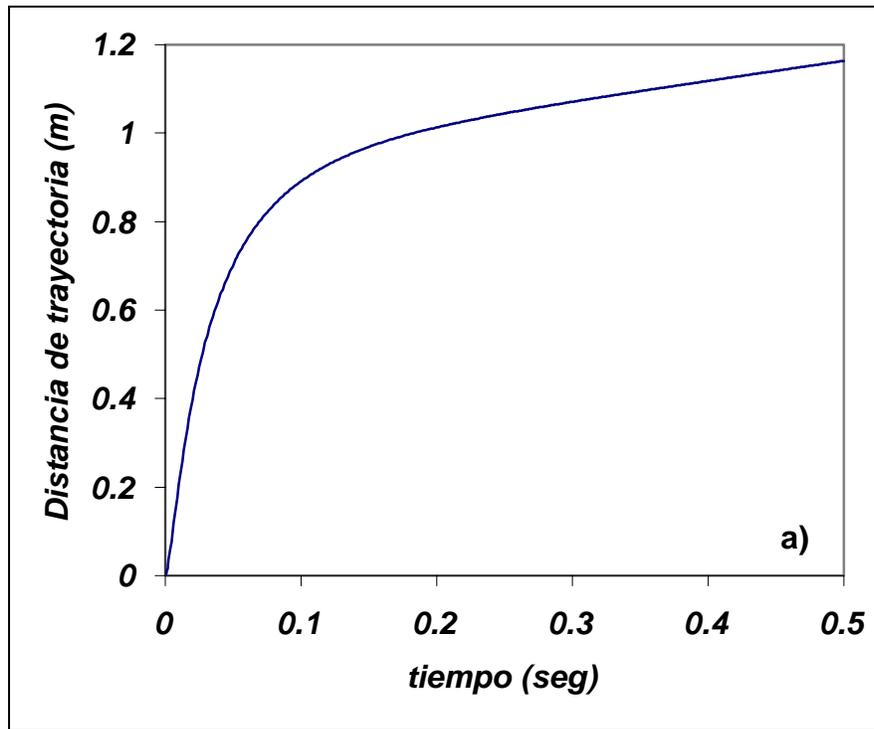


Figura 17a.

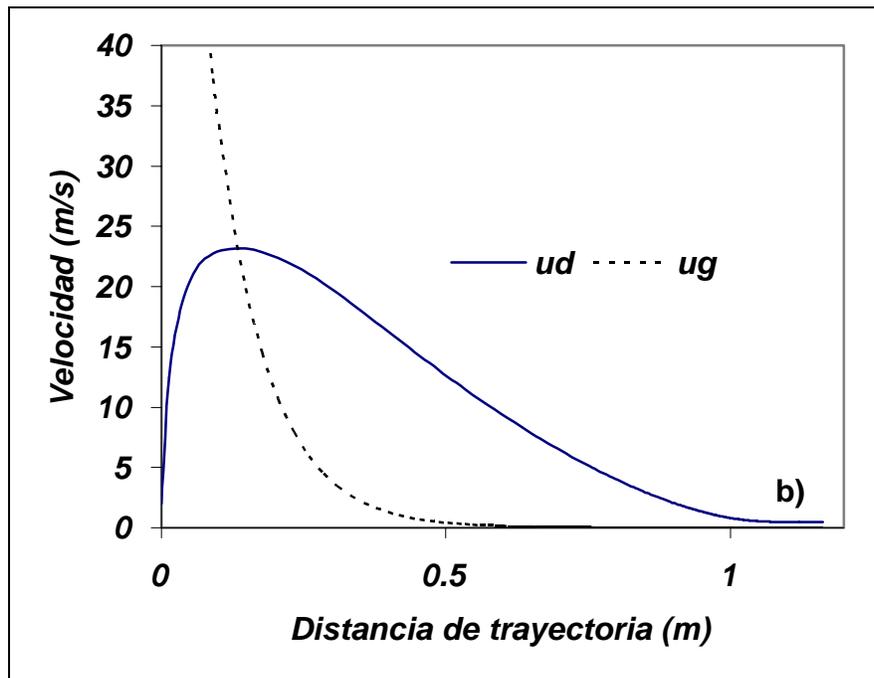


Figura 17b.

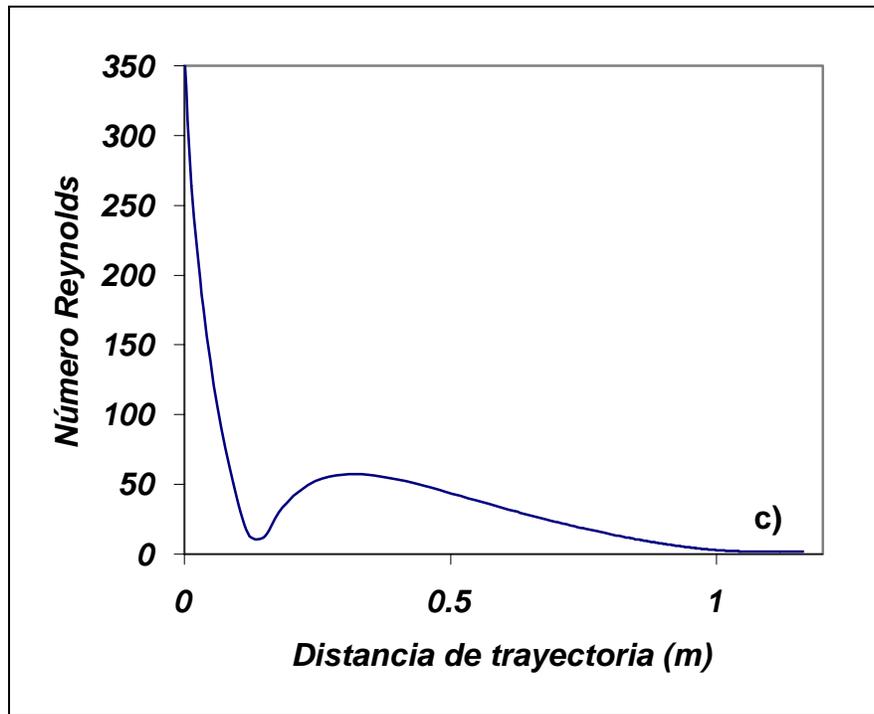


Figura 17c.

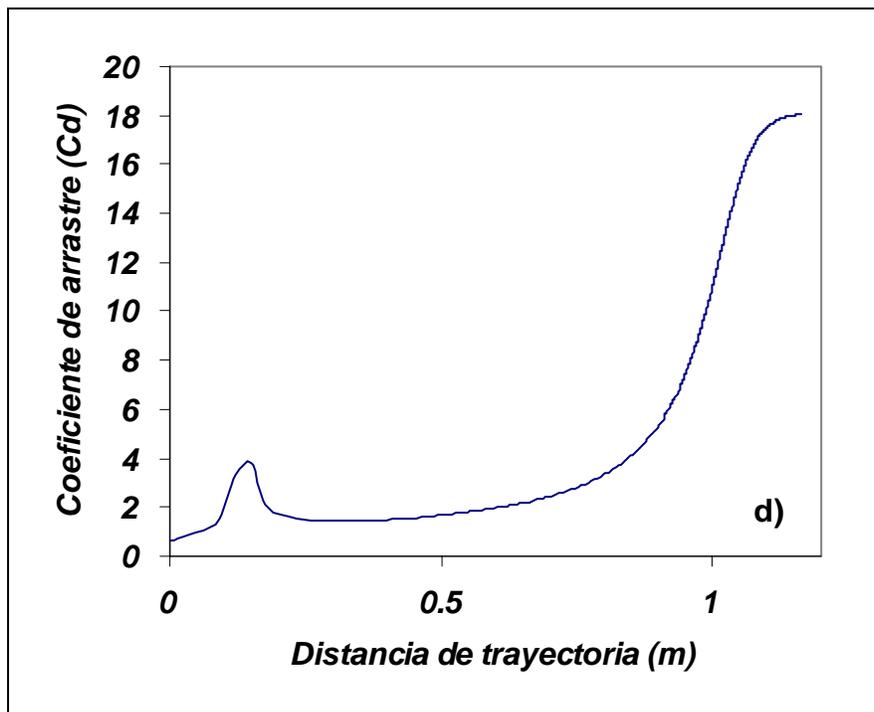


Figura 17d.

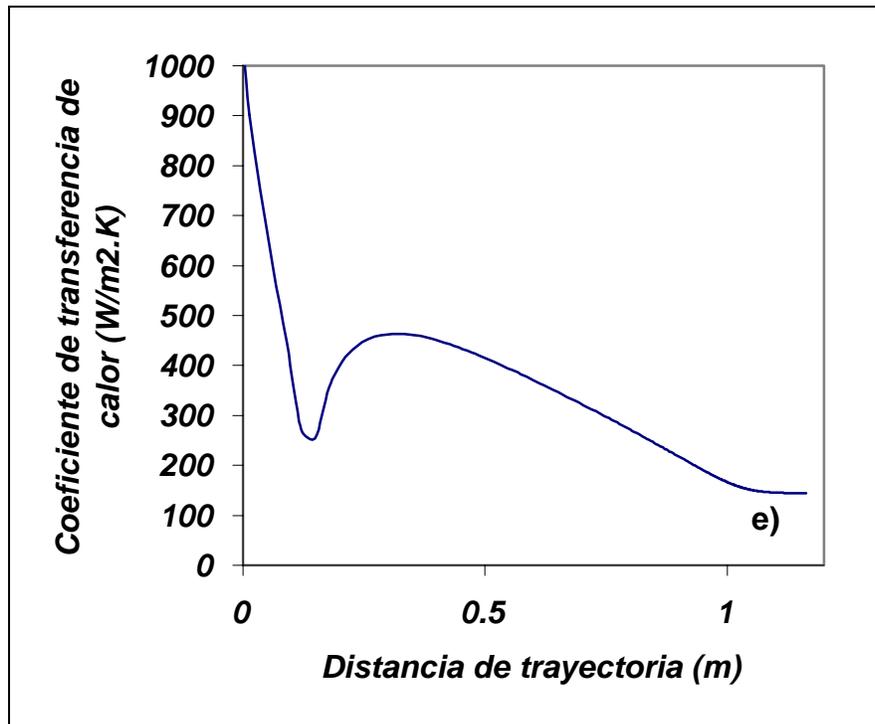


Figura 17e.

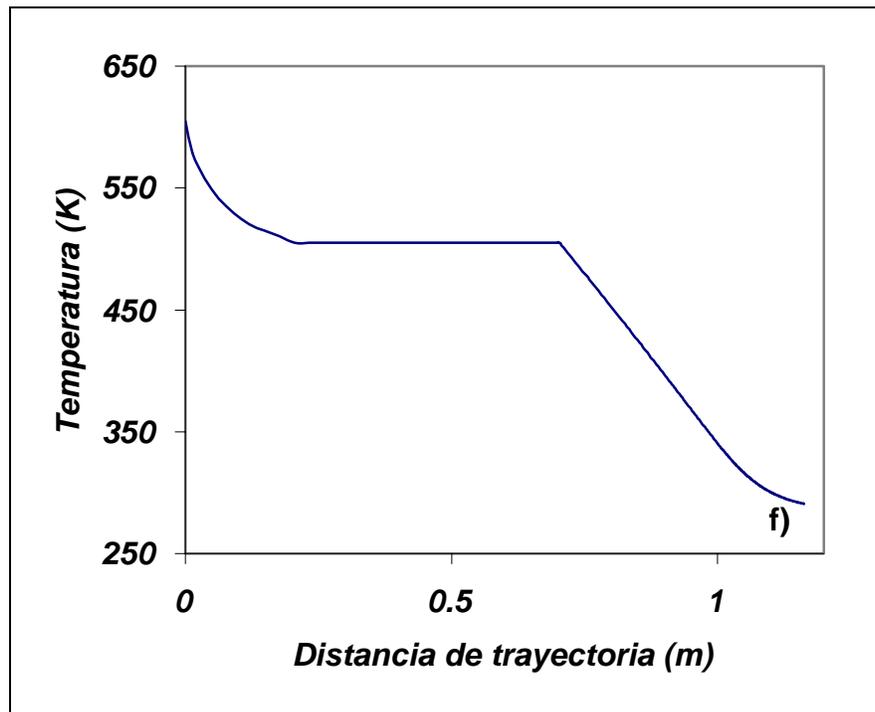


Figura 17f.

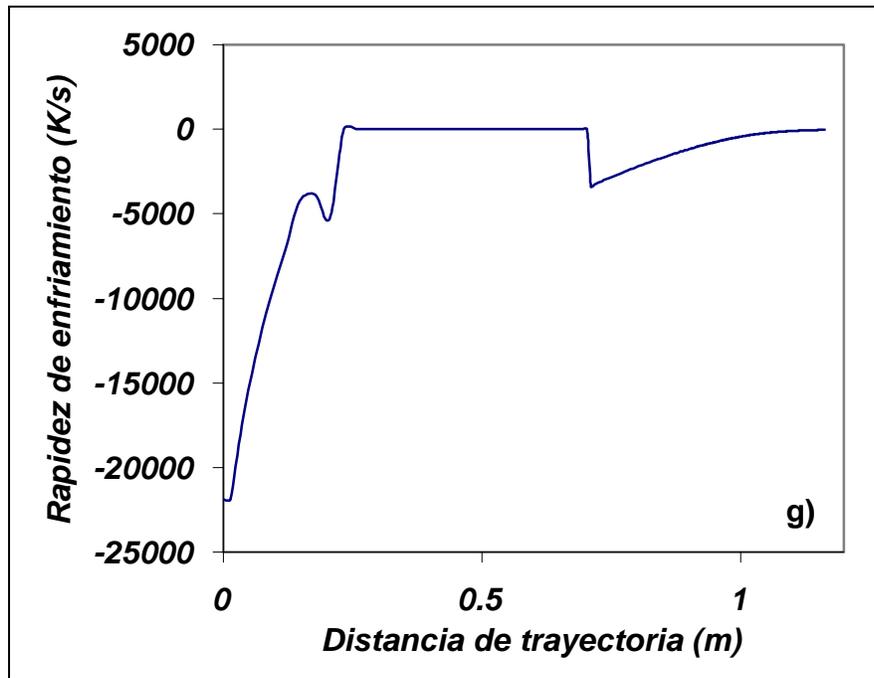


Figura 17g.

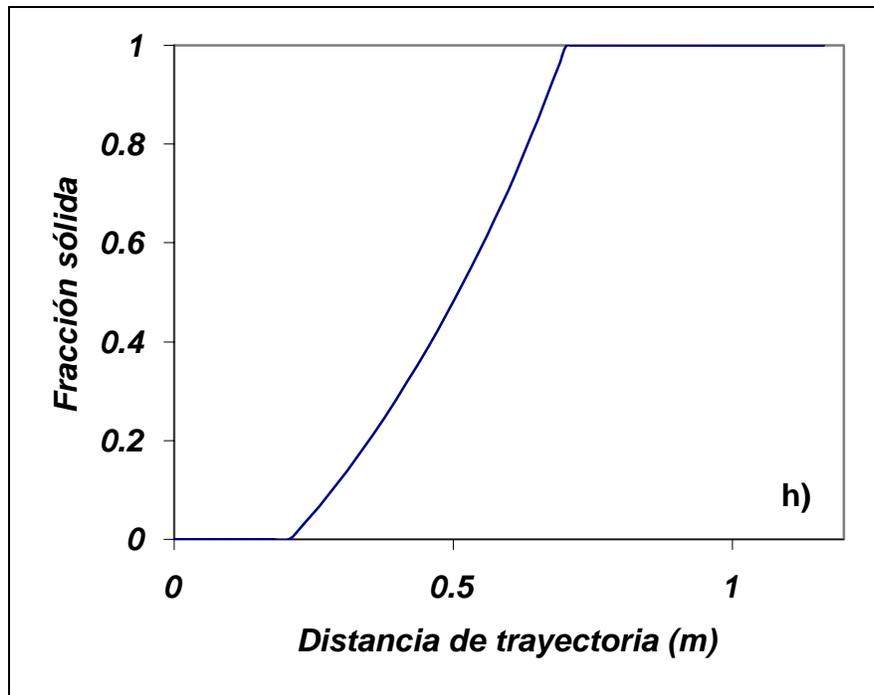


Figura 17h.

Figura 17. Información gráfica obtenida a partir del modelo propuesto para la atomización de

estaño con gas ($\rho_g = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1040 \text{ J/kg.K}$, $k_g = \text{W/kg.K}$).

6.2.2. Diseño del sistema.

En base a lo descrito en 5.2.2 se elaboró la siguiente tabla mostrando las distancias en las cuales se enfrían las partículas a una temperatura de 150°C para las diferentes condiciones simuladas, y junto a esto las dimensiones finales de la cámara de atomización.

No. de experimento	Distancia teórica (m) más 20%	Dimensiones del atomizador	
		Altura (m) más 10%	Ancho (m) más 10%
1	1.692	1.691767053	1.170942565
2	1.716	1.715763749	1.18755168
3	1.734	1.733761271	1.200008515
4	1.608	1.607778618	1.112810665
5	1.476	1.475796791	1.021460536
6	1.5	1.499793487	1.03806965
7	1.176	1.175838094	0.813846606
8	1.392	1.391808356	0.963328635

Tabla 10. *Predicción de trayectorias de enfriamiento y determinación de las dimensiones finales de la cámara de atomización.*

Los datos de la tabla nos indican que la cámara de atomización debe tener una altura aproximada de 1.75 m. y un ancho de 1.20 m. (ver figura 15). La cámara de atomización fue construida con una estructura de ángulo de acero de una pulgada de ancho por 1/8" de espesor cubierta con lámina "negra" calibre 22 sujeta con tornillos de 1/4" de diámetro; la tolva se construyó con cuatro láminas (lámina negra) triangulares a fin de que tuviera una caída de 45° , las uniones entre las láminas fueron selladas; la base de la tolva es abierta con un orificio cuadrado de 10 cm de lado, por lo que los polvos producidos son recibidos por un recipiente externo.

Toda la construcción fue cromada en su exterior y aluminizada en su interior (cubrimiento con resistencia de hasta 400°C de temperatura) con pintura metálica.

6.2.3. Diseño de experimentos y caracterización del polvo.

Una vez construida la cámara de atomización se llevaron a cabo las corridas experimentales con las condiciones descritas en la tabla 5; cabe señalar que debido a las limitaciones presentadas por el equipo de inyección de aire, los periodos experimentales fueron de 15 a 30 segundos dependiendo de la severidad del flujo. Pese a lo anterior siempre se recuperaron muestras de más de 100 gramos por lo que los análisis granulométricos fueron similares para todos los casos. La tabla que se presenta a continuación plasma la distribución másica de tamaños de partícula para cada experimento, junto con su respectivo diámetro medio de partícula y desviación estándar (ecuación 1). A partir de estos estudios se puede conocer el efecto que posee cada una de las variables de proceso sobre las características del producto; a continuación se presentan los gráficos obtenidos para cada caso en las figuras 18, 19, 20.

Malla	No. de experimento							
	1	2	3	4	5	6	7	8
45	27.8	15.9	12.9	25.7	17.2	15.5	8.4	10.7
60	30.7	25.6	29.4	33.3	28.6	28.8	14.1	22.1
80	18.5	22.9	25.3	20.3	22	22.7	17.4	22.8
100	7.8	11.4	10.9	7.9	10	10.1	11.7	10.6
140	9.7	13	13.5	7.4	11.1	11.3	18.6	17.2
200	4.3	7.6	6.3	3.5	6.9	6.7	14.1	10.4
230	0.9	2.2	1.3	0.7	1.9	2.1	4.3	2.6
400	0.7	2.6	1.6	0.7	2.2	2.5	7.3	3.6
-400	0.2	0.7	0.1	0.2	0.3	0.8	1.7	0.4
total (g)	100.6	101.9	101.3	99.7	100.2	100.5	97.6	100.4
dm (μm)	350	260	270	350	280	275	170	235
d16 (μm)	167	140	148	190	145	140	100	128
$\sigma =$	2.096	1.857	1.824	1.842	1.93103	1.96429	1.7	1.83594

Tabla 11. Distribución (en gramos), diámetro medio de partícula y desviación estándar para cada ensayo experimental.

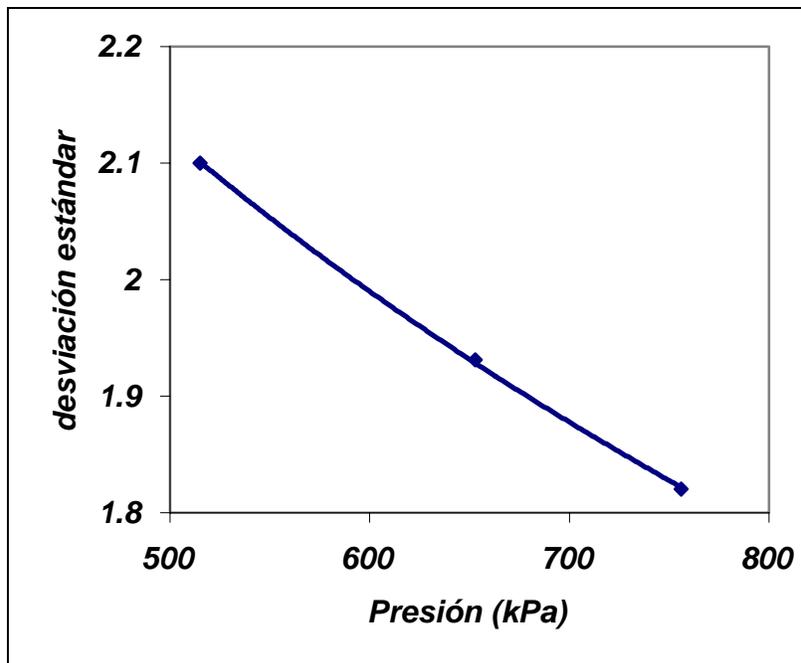
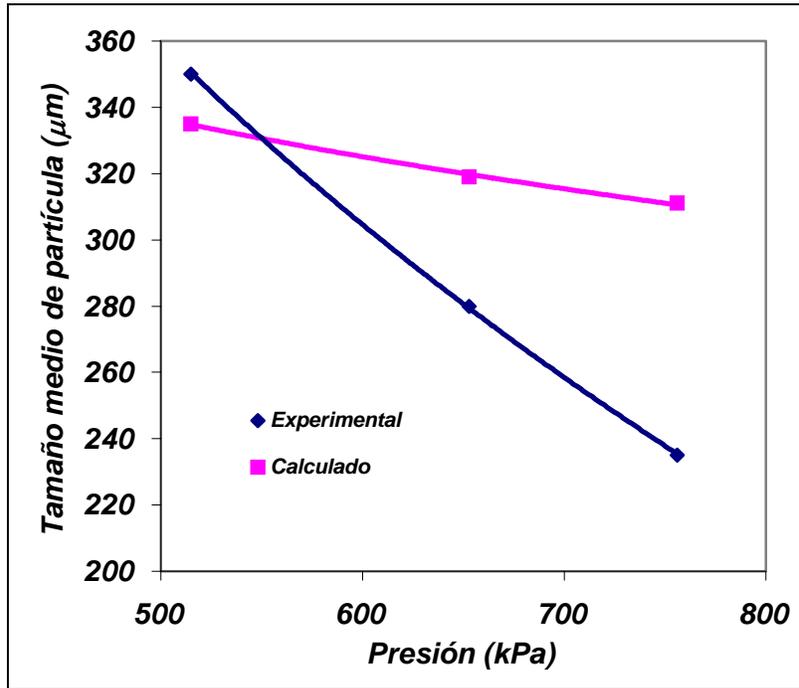


Figura 18. Efecto de la presión de la línea de aire sobre el diámetro medio de partícula y la desviación estándar.

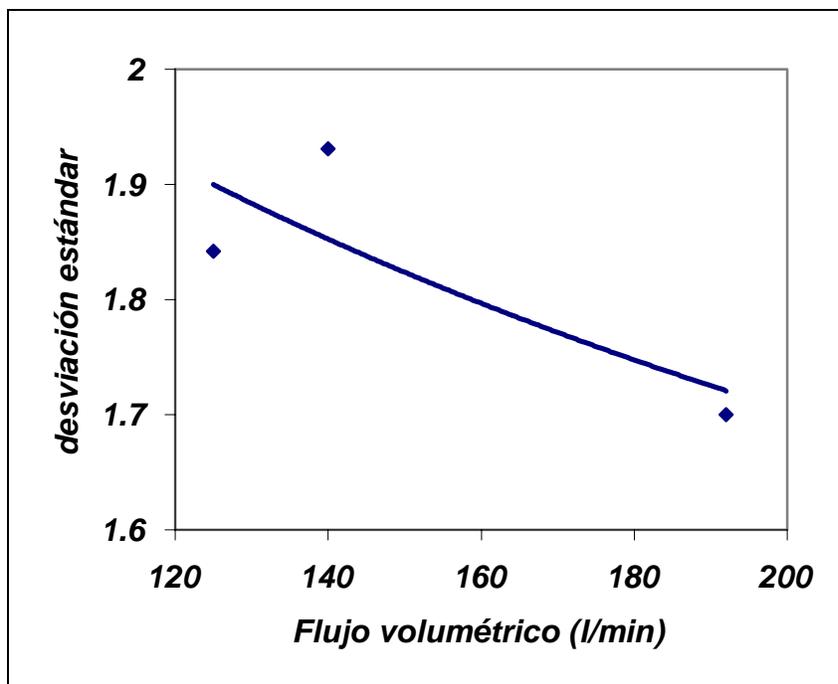
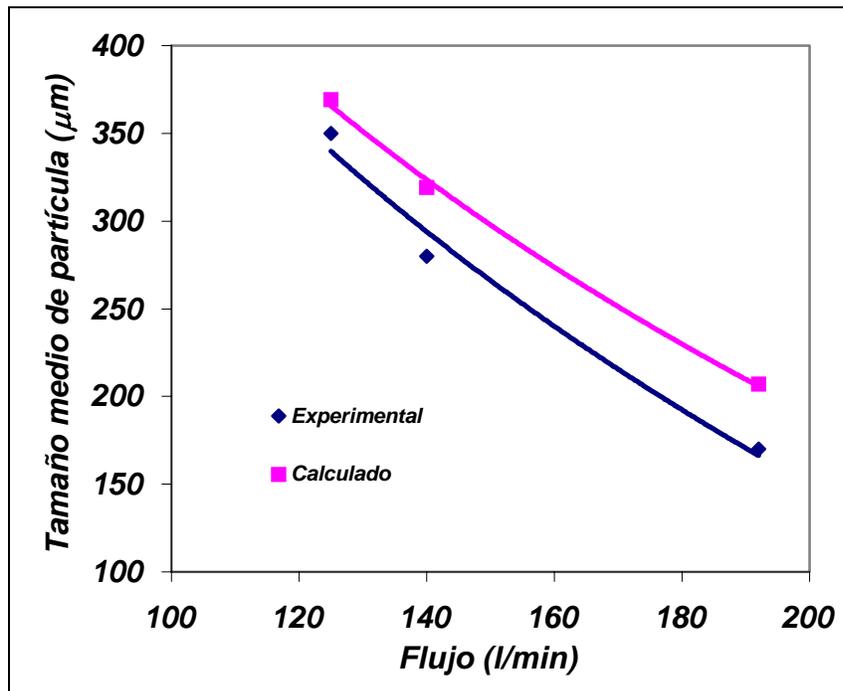


Figura 19. Efecto del flujo volumétrico de aire sobre el diámetro medio de partícula y la desviación estándar.

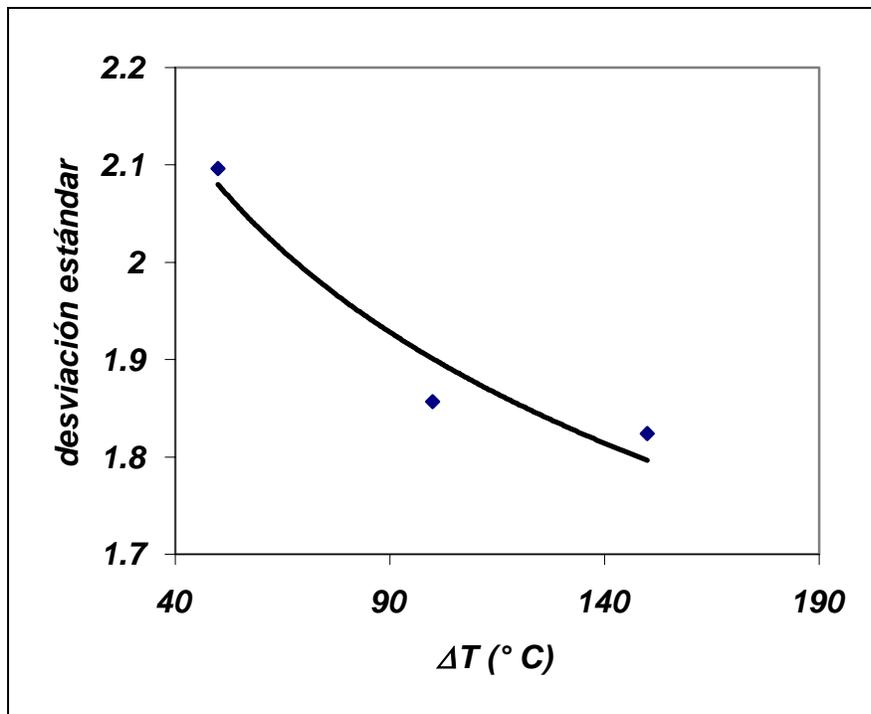
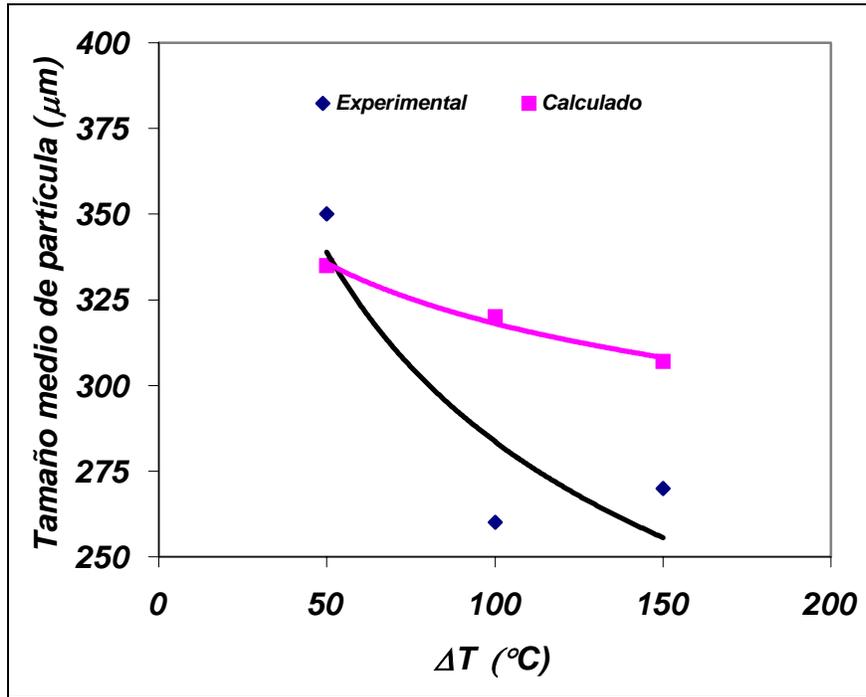
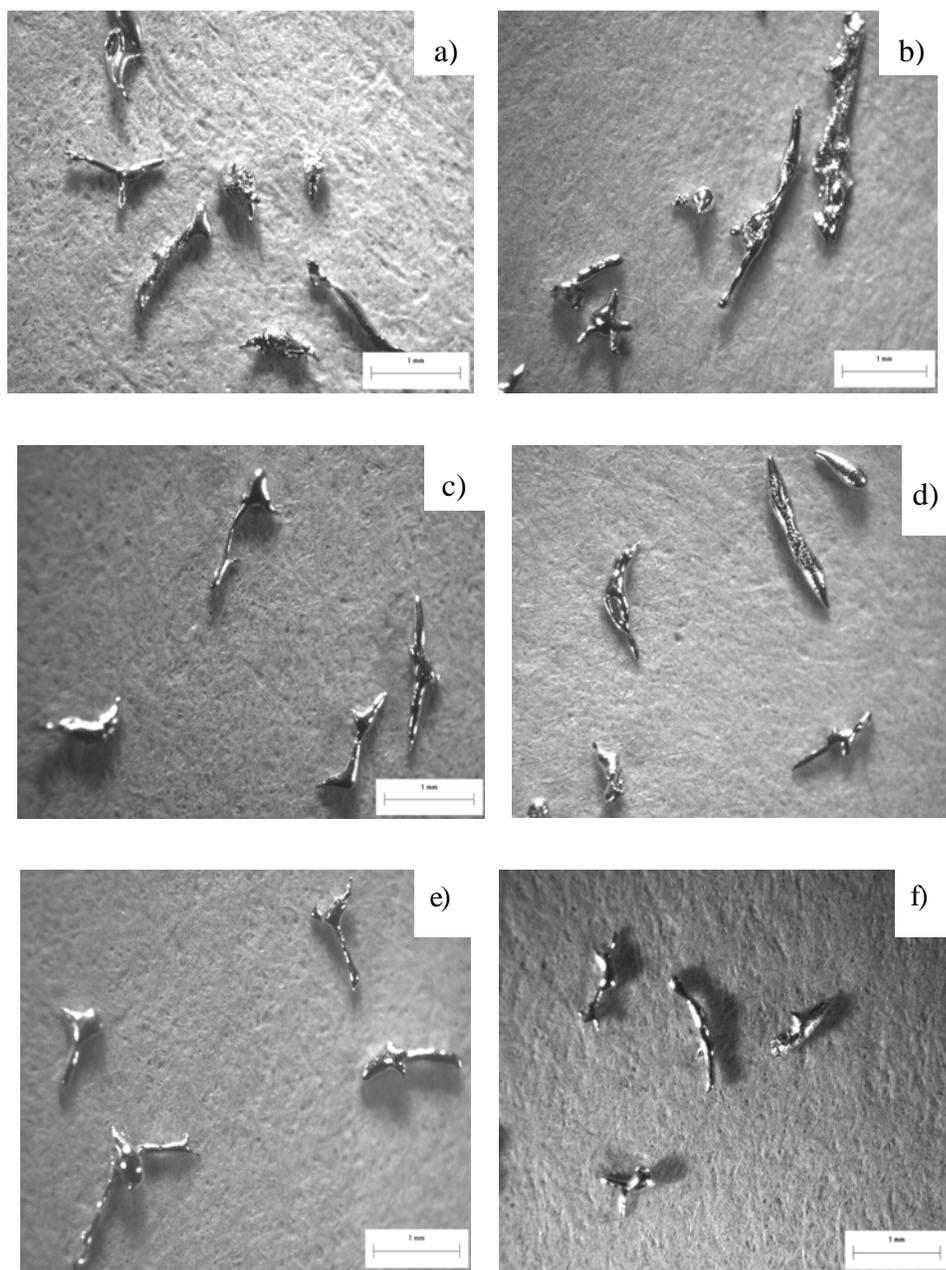


Figura 20. Efecto del sobrecalentamiento del metal fundido sobre el diámetro medio de

partícula y la desviación estándar.

Del análisis morfológico se pudo apreciar que existe una tendencia de las partículas a esferoidizarse mediante la variación de los parámetros de proceso, lo cual modificaría sus características físicas en etapas posteriores; es decir, rapidez de flujo, tiempo de flujo, etc.

Las siguientes fotografías muestran los polvos obtenidos de tamaños entre 600 y 355 μm (malla -30 +45); por otra parte, las relaciones gráficas entre las variables de proceso y el parámetro físico largo-diámetro se muestran en las figuras 22, 23 y 24.



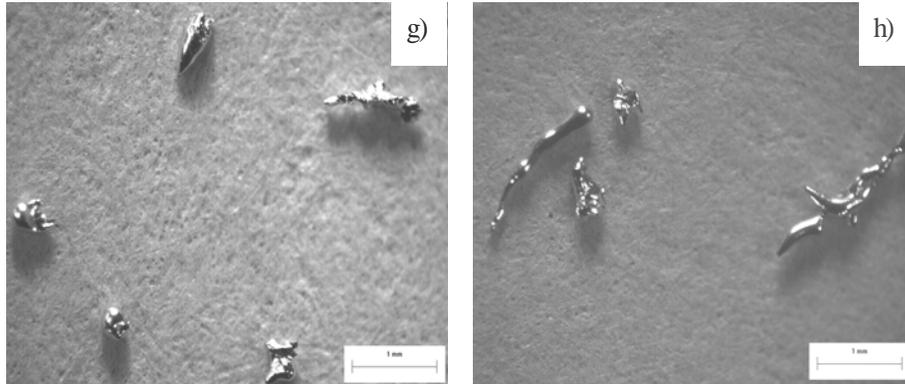


Figura 21. Morfologías obtenidas a partir de la experimentación. (a) Experimento 1, (b) Experimento 2, (c) Experimento 3, (d) Experimento 4, (e) Experimento 5, (f) Experimento 6, (g) Experimento 7, (h) Experimento 8; todas las muestras con tamaños de partícula entre $600\ \mu\text{m}$ y $355\ \mu\text{m}$ (malla -30 +45).

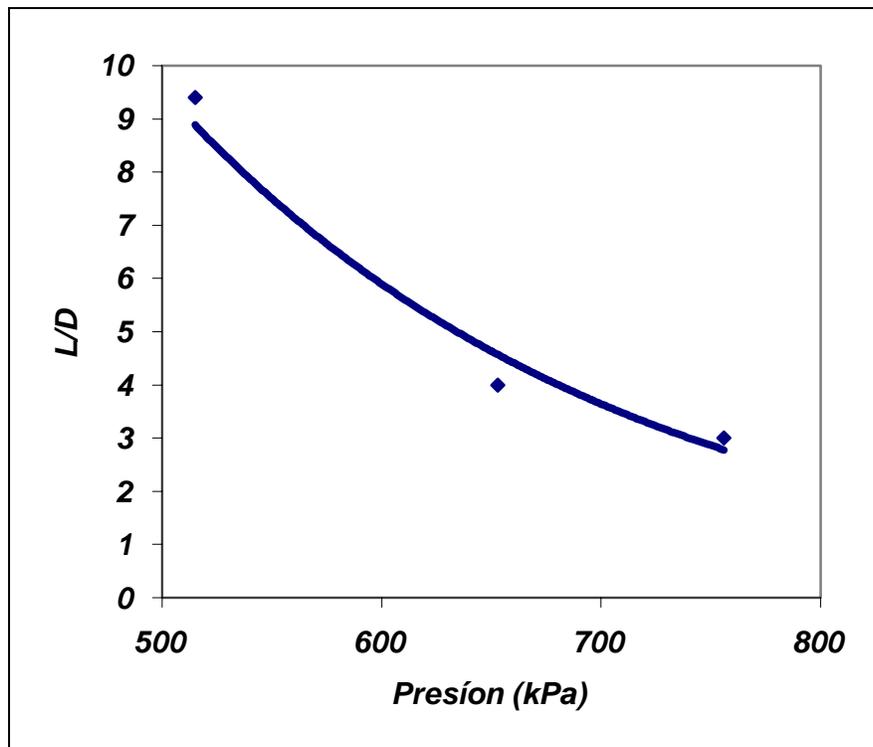


Figura 22. Efecto de la presión de la línea de aire sobre la morfología de la partícula.

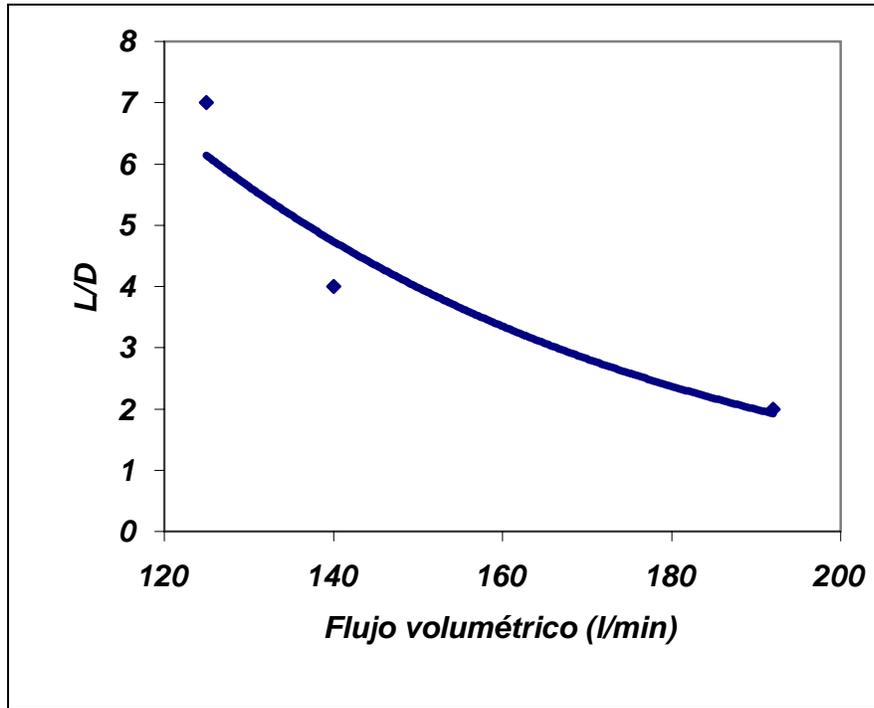


Figura 23. Efecto del flujo volumétrico de aire sobre la morfología de la partícula.

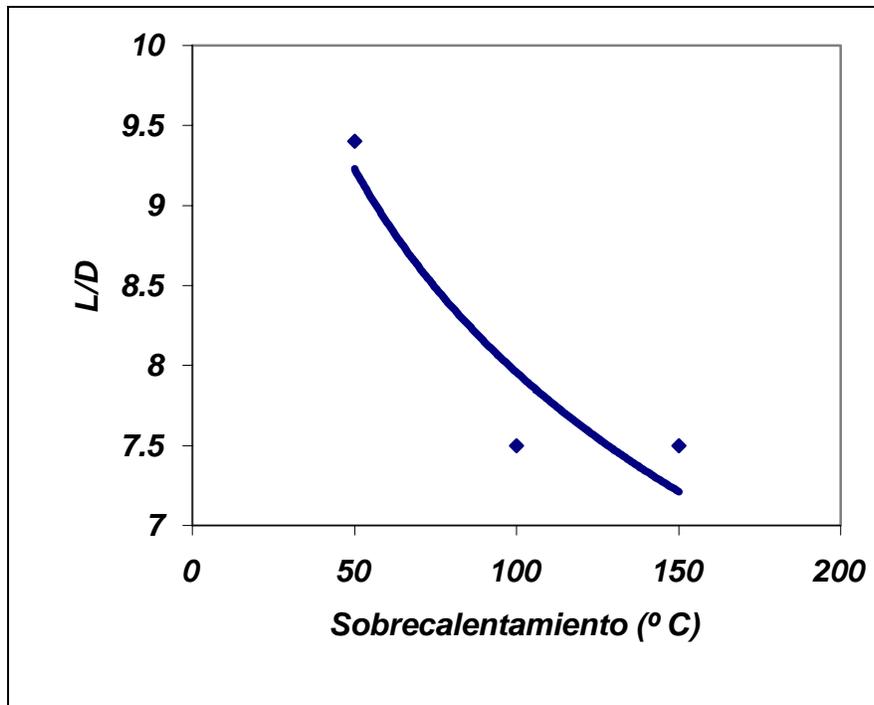


Figura 24. Efecto del sobrecalentamiento del metal fundido sobre la morfología de la partícula.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Diseño del sistema de atomización.

Conforme al estudio aerodinámico de la cortina de aire generada por la tobera se aprecia que a las condiciones de presión experimentales el ángulo permanece invariante y posee un valor aproximado de 25° el cual fue utilizado en los cálculos subsecuentes.

De acuerdo a la tabla 7, el crisol no presenta pérdidas energéticas considerables por fricción durante el vaciado del metal fundido, de aquí las ecuaciones 11, 12 y 13 se simplifican al igualar el coeficiente de descarga del crisol con la unidad. Considerando la potencia del equipo, en algunos casos no se alcanzó a atomizar por completo la masa de estaño líquido debido a las condiciones muy severas de inyección de aire.

7.2. Proceso de Atomización

Las propiedades del gas presentes en la salida de la tobera de atomización se muestran en la tabla 8, y se observa que ya sea incrementando la presión, de 515 a 756 kPa (60 a 95 psig), o el flujo volumétrico del aire, de 125 a 192 litros por minuto, en la línea aumenta su flujo másico, de 0.0143 a 0.0209 kg/s para la variación de la presión y de 0.0143 a 0.0256 kg/s dentro del rango de cambio en flujo volumétrico, con lo cual disminuye el diámetro medio de partícula. El flujo volumétrico tiene un efecto definido en cuanto a la velocidad del aire en la salida de la tobera, estos parámetros son proporcionales; pero no así con la presión y la densidad, ya que sus tendencias no están bien definidas; la presión en la línea tiene un efecto diferente sobre las características del aire en la salida de la tobera, ya que la presión y la densidad en este punto presentan una variación proporcional, mientras que la velocidad permanece prácticamente constante.

En la tabla 9 se aprecia que al incrementar la presión de la línea, de 515 a 756 kPa (60 a 95 psig) (simulación 1, 5 y 8), al incrementar el flujo volumétrico, de 125 a 192 litros por minuto (simulación 4, 5 y 7) o al incrementar el sobre calentamiento, de 50 a 150° C (simulación 1, 2 y 3), el diámetro medio de partícula disminuye (de 335 a 311 micras al aumentar la presión, de 369 a 207 micras para el incremento de flujo volumétrico y de 335 a 307 al incrementar el sobrecalentamiento); los dos primeros casos son debidos al incremento

de la transferencia de momentum cedida por el incremento de la cinética del gas (incrementando el flujo volumétrico) o por el incremento de la fuerza viscosa en virtud del aumento del flujo másico del aire (incrementando la presión o el flujo volumétrico de la línea de gas). En caso de aumentar la presión del gas debe tenerse cuidado en su valoración ya que podría tener un efecto adverso al mostrado en este trabajo, situación que es corroborada en la literatura⁽²⁾; esto se debe a que conforme con la ecuación 4 el incremento de la densidad del gas permite disminuir la viscosidad dinámica del gas y por lo tanto se genera un incremento en el diámetro medio de partícula. Analizando cuidadosamente la relación de Lubanska puede observarse que este efecto se puede controlar mediante las variaciones de densidad en la salida de la tobera y el flujo másico del gas las cuales dependen de las condiciones de operación y de la geometría de la línea y la tobera.

El análisis realizado en los resultados obtenidos de la simulación del proceso de atomización presenta que de la desintegración de la corriente de metal líquido y la subsiguiente formación de gotas que una vez solidificadas conforman al producto pulverulento, al paso del tiempo la trayectoria de vuelo de las partículas aumenta, figura 17a. Además se aprecia que al incrementar la distancia desde la zona de impacto (distancia de trayectoria igual a cero) la velocidad del gas disminuye y la velocidad de las partículas aumenta hasta llegar a un máximo en el cual se iguala con la velocidad del gas, a partir de este momento disminuye la velocidad de la partícula hasta llegar a un equilibrio ejercido por la fuerza de gravedad, es decir, la partícula volverá a acelerarse, figura 17b. En cuanto al número Reynolds se observa que en la zona de impacto posee un valor máximo, ya que la diferencia de velocidades entre el aire y la partícula es muy grande (aquí se da la máxima velocidad del gas y posiblemente la mínima del metal); posteriormente se presenta un mínimo (el cual debe ser cero) que corresponde en el punto donde las velocidades del aire y la partícula se igualan, más adelante se observa otro máximo que corresponde a la máxima diferencia de velocidades subsecuente, figura 17b, y por último cae nuevamente al disminuir las velocidades de ambas especies, figura 17c. El comportamiento de la variación del coeficiente de arrastre es en esencia adverso al presentado por el número Reynolds, ecuación 20 y figura 17d. Al suponer que el número Prandtl es constante, el coeficiente de transferencia de calor será una función proporcional del número Reynolds, ecuación 23, por lo que ambos comportamientos se describen bajo el mismo argumento, figura 17e. La historia térmica de las partículas descrita por la figura 17f

corresponde a aquella típica de un enfriamiento newtoniano con solidificación al equilibrio; con ayuda de la representación de la rapidez de enfriamiento, figura 17g, apreciamos un “recalentamiento” de la partícula antes de comenzar la solidificación debido al cambio dinámico entre las velocidades del aire y la partícula (se aprecia un cambio de pendiente durante el enfriamiento del líquido); después de la solidificación, el enfriamiento continúa hasta que el sistema haya extraído toda la diferencia de energía térmica de la partícula con respecto a su medio de enfriamiento. Por último, se presenta la fracción solidificada como función de la distancia de trayectoria de la partícula, figura 17h, aquí el fin de la solidificación corresponde al punto donde la fracción solidificada es igual a la unidad y es igual a aquel punto correspondiente al fin de la solidificación mostrado en la historia térmica de la partícula, figura 17g.

De los datos mostrados en la tabla 10, fue dimensionada la cámara de atomización; cabe señalar que el 20% de compensación por distribución de tamaños se otorgó haciendo el análisis dinámico y térmico a partículas con tamaño correspondiente al 16% de acumulado negativo (ecuación 1), a partir de este estudio se observó que la máxima diferencia de trayectoria se da al incrementar 20% las dimensiones generadas del estudio a partir de partículas con tamaño medio; por otro lado, el 10% de compensación por construcción del equipo se atribuye a un aseguramiento ingenieril de proceso (factor de seguridad). De la tabla 10 vemos que las mayores dimensiones se presentan en el experimento 3 (1.20 metros de largo y 1.73 metros de altura).

De la tabla 11 se aprecia los efectos de las variables de proceso durante la experimentación, de lo cual se afirma lo siguiente:

Al incrementar la presión de la línea de aire, de 515 a 756 kPa (60 a 95 psig) (experimentos 1, 5 y 8), al incrementar el flujo volumétrico del aire, de 125 a 192 litros por minuto (experimentos 4, 5 y 7), o al incrementar el sobrecalentamiento del metal líquido, de 50 a 150° C (experimentos 1, 2 y 3); el diámetro medio de partícula disminuye (de 350 a 235 micras al aumentar la presión, de 350 a 170 micras para el incremento de flujo volumétrico y de 350 a 270 al incrementar el sobrecalentamiento. Esta declaración coincide con aquella generada a partir del análisis numérico previamente descrita en este capítulo, por lo que los fundamentos de dicho comportamiento son los mismos para ambos casos, figuras 18, 19 y 20.

La desviación estándar decrece conforme la misma tendencia de las variables sobre el

diámetro medio de partícula, manteniendo sus valores en rangos cercanos a 2, situación característica de estos procesos; por lo tanto podemos afirmar que la variación en desviación estándar es proporcional a la variación de diámetro medio de partícula del sistema, figuras 18, 19 y 20.

La desviación del modelo con respecto a la experimentación al variar la presión de la línea es debida a la imposición de que la diferencia de presiones entre la superficie del metal líquido dentro del crisol y la boquilla es nula ($\Delta P = 0$), lo cual conforme se incrementa la presión en la línea es menos satisfactorio; y debido a la geometría de la tobera y de la corriente de metal líquido, y a las condiciones de flujo esta diferencia resulta ser negativa, es decir, la presión en la boquilla es mayor a la atmosférica, por lo que el flujo másico de metal disminuye junto con el diámetro medio de partícula, ecuación de Lubanska, figura 18.

La desviación producida por la variación de sobrecalentamiento se atribuye a que no se consideraron la variación de las propiedades termofísicas del metal fundido con respecto a la temperatura, sino que fueron consideradas constantes en todos los cálculos, y dichos valores son registrados a una temperatura cercana o igual a la de fusión; por ello la mejor aproximación se presenta en el sobrecalentamiento de 50° C. Tomando en cuenta esto, es fácil deducir que al incrementar el sobrecalentamiento disminuyen aquellas propiedades que otorgan resistencia a la corriente líquida contra su desintegración (viscosidad y tensión superficial), por lo que será más factible la disminución de tamaños de partícula, lo cual es presentado en la figura 20.

De la figura 21 se aprecia que la forma de las partículas es de ligamentos redondeados compuestos, es decir, casi todas las partículas son la coalescencia de gotas individuales dada en una zona próxima a la de impacto; la razón de esto es que en dicha zona se presentó una gran turbulencia de flujo de aire. Observando la figura 21 se puede indicar que también la morfología de las partículas es afectada por la variación de los parámetros de proceso; tendiéndose a producir partículas esféricas, esto es que la razón L/D tiende a la unidad, conforme se incrementan la presión de la línea (L/D de 9.5 a 4 al aumentar la presión dentro del rango de estudio), el flujo volumétrico (L/D de 6.3 a 1.8 al incrementar el flujo volumétrico) y el sobrecalentamiento (L/D de 9.5 a 7.4 incrementando el sobrecalentamiento). Por lo tanto, podemos afirmar también que las partículas tenderán a esferoidizarse conforme disminuye el diámetro medio de partícula.

8. CONCLUSIONES

El presente trabajo arroja una serie de conclusiones interesantes sobre el conocimiento, el control y el mejoramiento del proceso de atomización con gas ensayado en esta tesis, las cuales se mencionan a continuación.

- Se obtuvo polvo metálico atomizando estaño fundido con la tobera analizada y la cámara de atomización construida.
- La descripción física con agua de la tobera de atomización indica que el prototipo de geometría anular, con una tobera de atomización que genera una cortina cónica V cerrada con un ángulo de 25° a las presiones de experimentación utilizadas.
- Para la atomización de estaño con aire bajo las condiciones de línea descritas en el punto anterior, se requiere de una cámara de colección con las siguientes dimensiones calculadas por el modelo matemático presentado:
 - Altura: 1.75 metros.
 - Ancho: 1.20 metros.
- El diámetro medio de partícula disminuye de 350 a 235 micrones al incrementar la presión del aire de 515 a 756 kPa (60 a 95 psig), de 350 a 170 al incrementar el flujo volumétrico del aire de 120 a 192 l/min y de 350 a 270 al incrementar el sobrecalentamiento del metal líquido de 50 a 150 °C.
- Las partículas tienden a esferoidizarse (la razón largo-diámetro de los polvos obtenidos tiende a ser igual a la unidad) conforme se disminuye el diámetro medio de partícula, esto es L/D disminuye de 9.4 a 3 al incrementar la presión del aire de 515 a 756 kPa (60 a 95 psig), de 7 a 2 al incrementar el flujo volumétrico del aire de 120 a 185 l/min y de 9.4 a 7.5 al incrementar el sobrecalentamiento del metal líquido de 50 a 150 °C.
- Los datos experimentales descritos tienen buena concordancia con los valores predeterminados en la simulación, por lo cual el modelo matemático desarrollado en esta tesis es capaz de simular el proceso de atomización con aire para estaño bajo las condiciones de experimentación llevadas a cabo en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Sánchez de Jesús y Bolarín.** “Curso: Procesamiento de Materiales mediante Técnicas Pulvimetalúrgicas”. Facultad de Ingeniería, UNAM. Agosto 2002.
2. **Lawley A.** “Atomization: The Production of Metal Powders”. MPIF, Princeton, New Jersey, 1992.
3. **German R. M.** “Powder Metallurgy Science”. 2a. edición; MPIF, Princeton New Jersey, 1998.
4. **Schatts y Wieters.** “Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffen”. EPMA, VDI – Verlag Gmbh, Dusseldorf, 1994.
5. **Thümmeler y Oberacker.** “An introduction to Powder Metallurgy”. The Institute of Materials, Cambridge, 1993.
6. **Lenel F. V.** “Powder Metallurgy: Principles and Applications”. MPIF, Princeton, New Jersey, 1994.
7. **Lubanska H.** “Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals”. Journal of Metals, 22-2 (1970), pp 45 – 49.
8. **Rao y Methrotta** “Effect of process variables on atomization of metals and alloys. Modern Developments in Powder Metallurgy, 12 (1980), pp 113 – 130.
9. **Tallmadge J.** “Powder Production by Gas and Water Atomization of Liquids Metals”. Powder Metallurgy Processing: New Techniques and Analysis, editado por Kuhn H. y Lawley A., Academic Press, New York, 1978, pp 1 – 32.
10. **Ünal A.** “Gas Flow in Atomization Nozzles”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 201 –227.
11. **Ridder, Espina y Biancaniello** “Optimization of Inert Gas Atomization”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 163 –173.
12. **Nieves y Domínguez** “Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería”. Cía. Editorial Continental S.A. de C.V., México, 1999.
13. **Konvalina y Wileman** “Programación con Pascal”. Mc. Graw Hill, México, 1988.

14. **Fox y McDonald** “**Introducción a la Mecánica de Fluidos**”. 2ª edición, McGraw Hill, México, 1995.
15. **Lavernia y Wu** “**Spray Atomization and Deposition**”. John Wiley and Sons, New York, 1996.
16. **Srivatsan y Sudarshan** “**Rapid Solidification Technology: An Engineering Guide**”. Technomic Publishing Co., Lancaster, 1996.
17. **See y Runkle**. “**The Disintegration of Liquid Lead Stream by Nitrogen Jets**”. Metallurgical Transactions, 4 (1973), pp 2669 – 2673.
18. **Rivera, Juárez y Sánchez de Jesús**. “**Atomización con Gas: Una Visión Actual**”. Memorias del 2º Congreso Nacional de Pulvimetalurgia, Querétaro, Octubre 2003.
19. **Hohmann y Jonson**. “**New Concepts for Inert Gas Atomization Plants**”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 35 –45.
20. **Tingskog T. A.** “**Powder Production by Conventional and Specialized Inert Gas Atomization: Production at Anval NYBY Powder AB**”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 121 – 131.
21. **Anderson, Morton y Figliola**. “**Fluid Flow Effects in Gas Atomization Processing**”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 229 –249.
22. **Gutierrez-Miravete y Lavernia** “**Thermal Conditions and Microstructure in Ultrasonically Atomized Aluminum Alloys**”. Physical Chemistry of Powder Metals: Production and Processing edited by W. Murray, The Minerals, Metals and Materials Society, 1989, pp 175 – 199.
23. **Anand, Kaufman y Grant**. “**Rapid Solidification of a Modified 7075 Aluminum Alloy by Ultrasonic Gas Atomization**”. Rapid Solidification Processing II, 1980, pp 273 – 286.
24. **Mahesh, Mendonca, Muralidhara y Ramachandra**. “**Modeling of Droplet Dynamic and Thermal Behavior During Spray Deposition**”. Bull. Mater. Sci., 26 (2003), pp 355 – 364.

25. **Pariona, Bolfarini, dos Santos y Kiminami**. “Application of Mathematical Simulation and the Factorial Design Method to the Atomization Stage in the Spray Forming of a Cu – 6% Zn Alloy”. Journal of Materials Processing Technology, 102 (2000), pp 221 – 229.
26. **Peretti y Holic** “Gas Atomizer for P/M Research and Development”. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (1992), pp 105 – 111.
27. **Tornberg C.** “Particle Size Prediction in an Atomization System”. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (1992), pp 137 – 150.
28. **Anderson y Figliola** “Fundamentals of High Pressure Gas Atomization Process Control”. Advances in Powder Metallurgy, 5 (1991), pp 237 – 248.
29. **Lawley A.** “Atomization”. Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, pp 1 – 6.
30. **Osella, Espina, Ridder, Biancaniello y Mattingly** “Correlation of Particle Size Distribution with Process Parameters of a Gas – Metal Atomizer”. Proceedings of 1994 Powder Metallurgy World Congress, París, pp 391 – 394.
31. **von Berg, Bürger, Cho y Schatz** “Process Modelling for Gas Atomization of Liquid Metals Jets”. Proceedings of 1994 Powder Metallurgy World Congress, París, pp 315 – 320.
32. **Osella, Espina, Ridder, Biancaniello y Mattingly** “A Hybrid Model of a Gas – Metal Atomizer and its Application to the Development of a Knowledge – Based Control System”. Proceedings of 1994 Powder Metallurgy World Congress, París, pp 349 – 352.
33. **Miller R. S.** “Real Time Visualization of Close – Coupled Gas Atomization”. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (1992), pp 113 – 125.
34. **Pourier y Geiger** “Transport Phenomena in Materials Processing”. TMS, 1994.
35. **Flemings M. C.** “Solidification Processing”. Mc. Graw Hill, New York, 1974.
36. **Kurz y Fisher** “Fundamentals of Solidification”. 3a. edición, Trans Tech Publications, Aedemansdorf, Suiza, 1989.

APÉNDICE A

En la atomización con gas, la forma final de la gota de metal líquido es influenciada por la diferencia relativa entre las magnitudes del tiempo de solidificación y el tiempo requerido para que las fuerzas de tensión superficial esferoidicen la gota. En ausencia de otros efectos (capas de óxido, elementos modificadores de tensión superficial, etc.), sí el tiempo de esferoidización de la gota líquida es pequeño comparado con su tiempo de solidificación, entonces las partículas tenderán a ser de forma esférica.

En el modelo desarrollado por Nichiporenko y Naida^(2,3,4) para el tiempo de solidificación en la atomización con gas, se considera que las gotas de metal fundido no presentan subenfriamiento, que la velocidad relativa entre el gas y la partícula es constante y que sólo la transferencia de calor convectivo es importante. Este modelo fue modificado por See y Johnston⁽¹⁶⁾ para incluir el tiempo necesario para que la partícula pierda su calor latente de fusión; con esta modificación, el tiempo total de solidificación t_{sol} (en segundos) está dado por:

$$t_{sol} = \frac{d_m \rho_m}{6h_c} \left[C p_m \ln \left(\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} \right) + \frac{\Delta H_m}{T_m - T_g} \right] \quad (A1)$$

donde d_m es el diámetro medio de partícula (m)

h_c es el coeficiente de transferencia de calor convectivo

$$\left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

ρ_m es la densidad del metal líquido $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

$C p_m$ es la capacidad calorífica del metal líquido $\left(\frac{J}{kg.K} \right)$

T_i es la temperatura inicial de la partícula (K)

T_g es la temperatura del gas (K)

T_m es la temperatura de fusión del metal; la temperatura líquidus para aleaciones (K)

ΔH_m es el calor latente de fusión del metal $\left(\frac{J}{kg} \right)$

Sólo en el caso de la influencia de fuerzas de tensión superficial, el tiempo para la esferoidización t_{sph} de las gotas de metal fundido está dado por:

$$t_{sph} = \frac{3\pi^2 \mu_m}{4V\sigma_m} (R^4 - r^4) \quad (A2)$$

donde μ_m es la viscosidad dinámica del metal líquido (*Pa.s*)

V es el volumen de la partícula (m^3)

σ_m es la tensión superficial del metal líquido ($\frac{N}{m}$)

r es el radio del cilindro o del ligamento antes de la transformación a gotas esféricas (m)

R es el radio de la partícula esférica (m).

APÉNDICE B

Las propiedades de un fluido en flujo compresible son afectadas por el cambio de área, la fricción, la transferencia de calor y las ondas de choque normales. En este caso sólo se considera el efecto por el cambio de área; es decir cuando el flujo pasa de la línea de aire a la tobera del atomizador.

Al considerar el efecto de la variación de área sobre las propiedades del aire en flujo isentrópico^(14, 15), debemos estar interesados principalmente en la velocidad y la presión. La figura B1 presenta las principales variables que intervienen en este tipo de proceso.

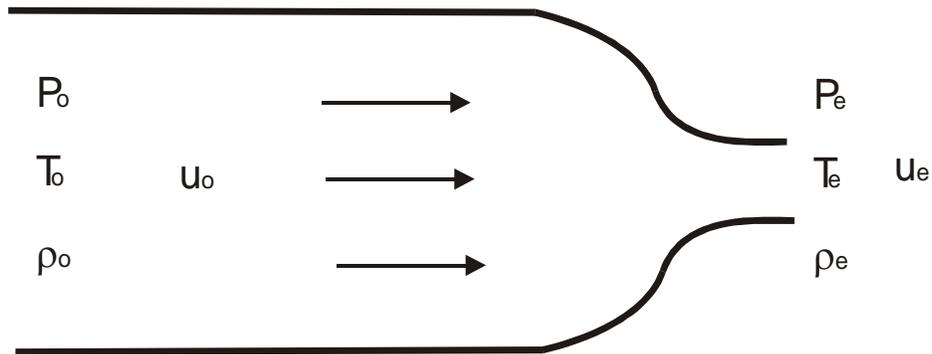


Fig. B1. Principales variables que intervienen en la dinámica del aire.

De acuerdo al modelo de flujo isentrópico con variación de área en el ducto⁽¹⁴⁾, y conociendo la presión (P_o), la velocidad (u_o) y la temperatura (T_o) del aire en la línea, el cambio del número Mach está dado por la siguiente expresión:

$$\frac{A_o}{A_e} = \frac{M_e}{M_o} \left[\frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_o^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_e^2} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2\gamma - 2}} \quad (\text{B1})$$

donde A_o es el área del ducto de la línea de aire (m^2)

A_e es el área de la tobera del atomizador (m^2)

M_o es el número Mach del aire en la línea

M_e es el número Mach del aire en la tobera

γ es la razón de calores específicos $\left(\frac{C_p}{C_v}\right)$

Dicha ecuación es resuelta numéricamente para M_e , en este caso aplicando el método de Newton-Raphson.

Conociendo el número Mach en la tobera es fácil deducir la temperatura, la presión y la densidad del aire en dicha zona mediante el uso del mismo modelo de flujo isentrópico.

$$T_e = T_o \left[\frac{A_o M_o}{A_e M_e} \right]^{\frac{2\gamma-2}{\gamma+1}} \quad (B2)$$

$$P_e = P_o \left[\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_o^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (B3)$$

$$\rho_e = \rho_o \left(\frac{P_e}{P_o} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (B4)$$

Con la temperatura del aire en la tobera se conoce la velocidad del sonido en la tobera, c_e , con la siguiente expresión.

$$c_e = \sqrt{\gamma R_g T_e} \quad (B5)$$

Con éste valor podemos calcular la velocidad del aire en la tobera tal y como queda manifestado en la ecuación 15.

El flujo másico del aire puede ser calculado mediante la expresión:

$\dot{m} = \rho_e u_e A_e$; cuyo valor debe ser igual al obtenido en la ecuación 14 con las condiciones de la línea.

APÉNDICE C

Propiedades termofísicas del estaño.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad	7000	kg/m ³
Punto de fusión	232	° C
Capacidad calorífica del metal sólido	360	$\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$
Capacidad calorífica del metal líquido	255	$\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$
Calor latente de fusión	4.2 x 10 ⁸	$\frac{\text{J}}{\text{m}^3}$
Viscosidad	0.5382	mN.s/m ²
Tensión superficial	0.5382	mN/m

Propiedades termofísicas del aire.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Viscosidad	1.8 x 10 ⁻⁵	Pa.s
Capacidad calorífica	1020	$\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$
Conductividad térmica	1.29 x 10 ⁻³	$\frac{\text{W}}{\text{m.K}}$

APÉNDICE D

La técnica para la determinación de los parámetros morfológicos, L y D , de las partículas irregulares obtenidas en la experimentación es aquella descrita por Tallmadge⁽⁹⁾, la cual se describe a continuación.

Por cada ensayo experimental se tomaron muestras que se analizaron microscópicamente mediante la técnica descrita en la sección 5.2.5 cuyos resultados se presentan en la sección 6.2.3; las muestras consistieron en poblaciones de 50 partículas cada una, las cuales fueron capturadas en una serie de fotografías a 200X. A cada una de las partículas se les trazó, en las fotografías, un rectángulo que encerrará su forma; con la escala presentada en las fotografías se determinó las dimensiones de los lados del rectángulo, asignando el mayor de estos valores al parámetro L y el menor para D , tal como se muestra en la figura D1.

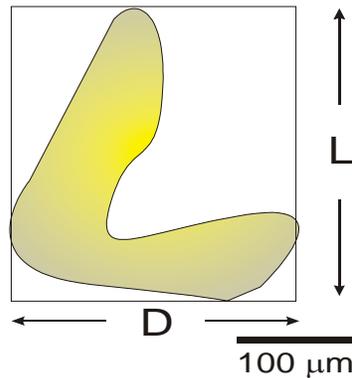


Fig. D1. Determinación de los parámetros morfológicos de las partículas.

Una vez llevado a cabo lo anterior, se determinaron estadísticamente parámetros morfológicos promedio para cada ensayo conforme a las siguientes relaciones.

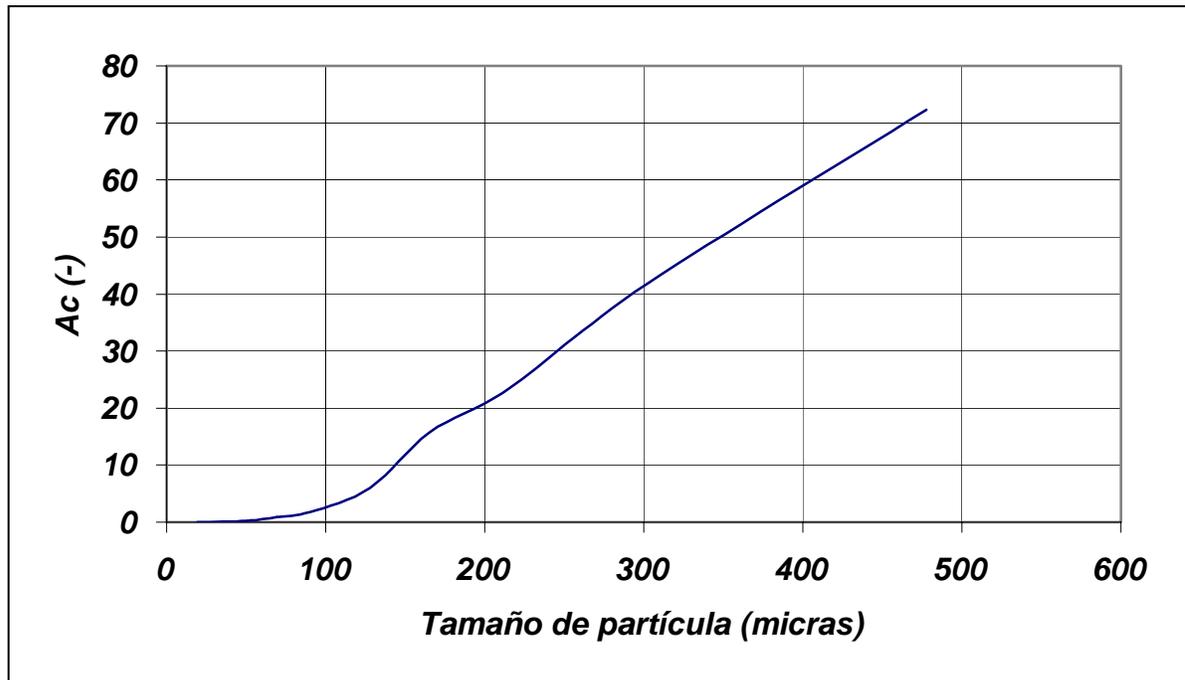
$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^{50} L_i}{50} \quad (D1)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{50} D_i}{50} \quad (D2)$$

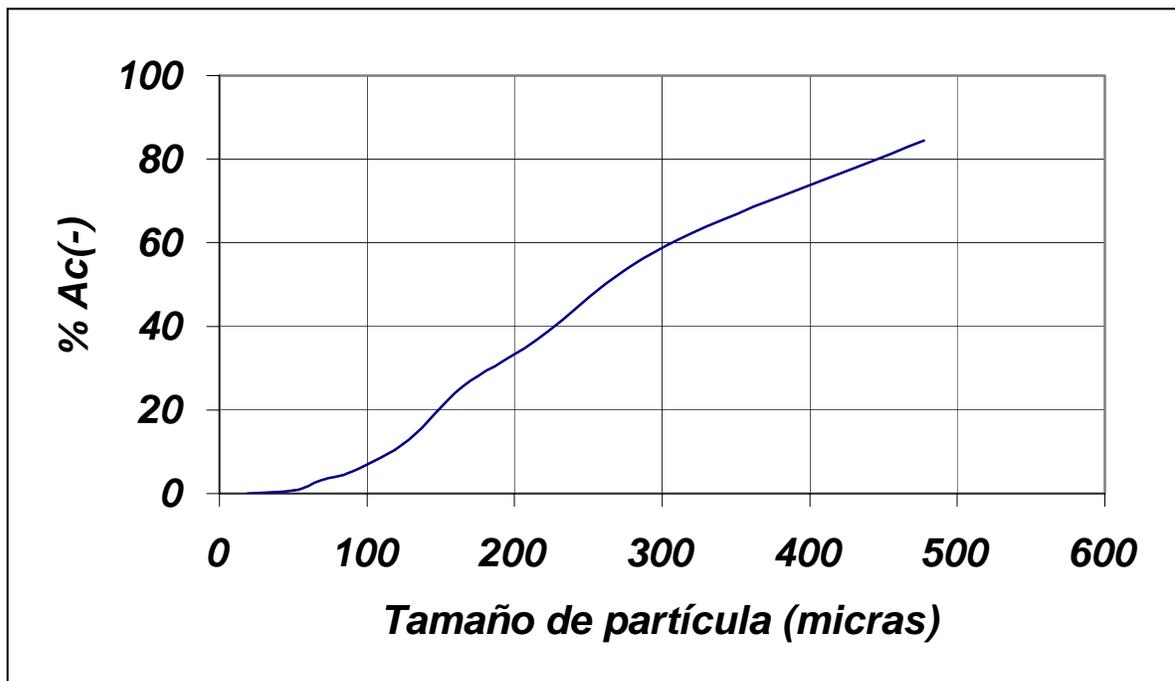
Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones (D1) y (D2) son los reportados absolutos para cada experimento y representados en los gráficos de las figuras 22-24.

APÉNDICE E

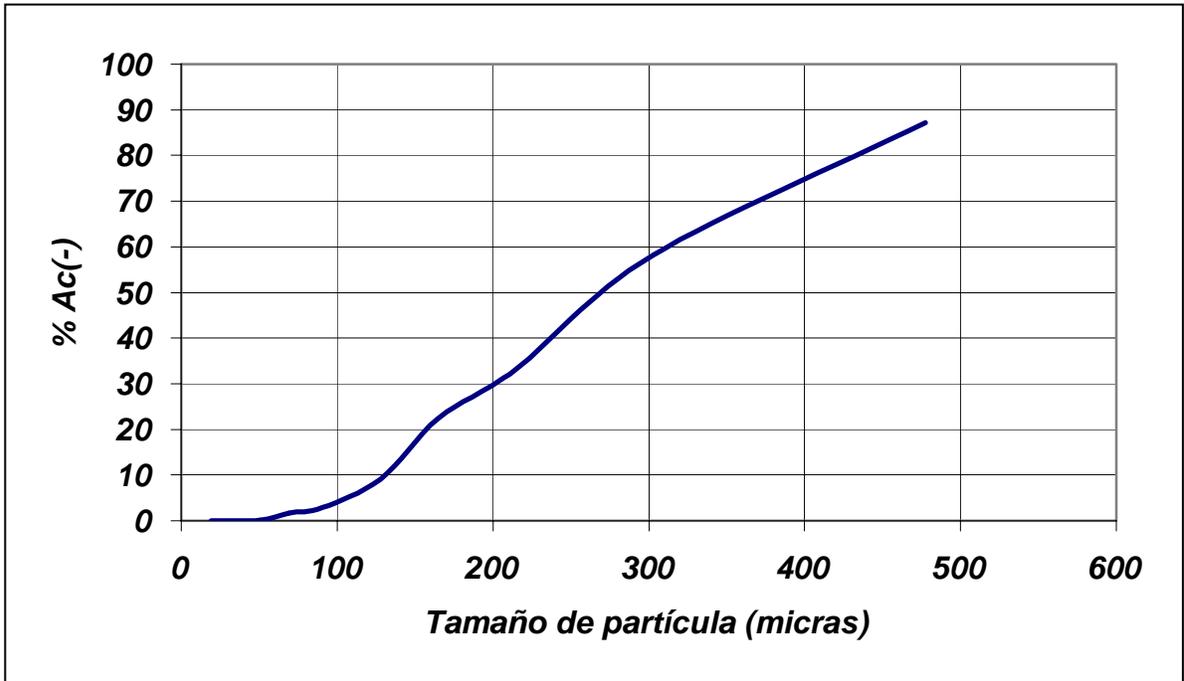
Relaciones gráficas “por ciento en peso de acumulado negativo – tamaño de partícula” para cada ensayo experimental.



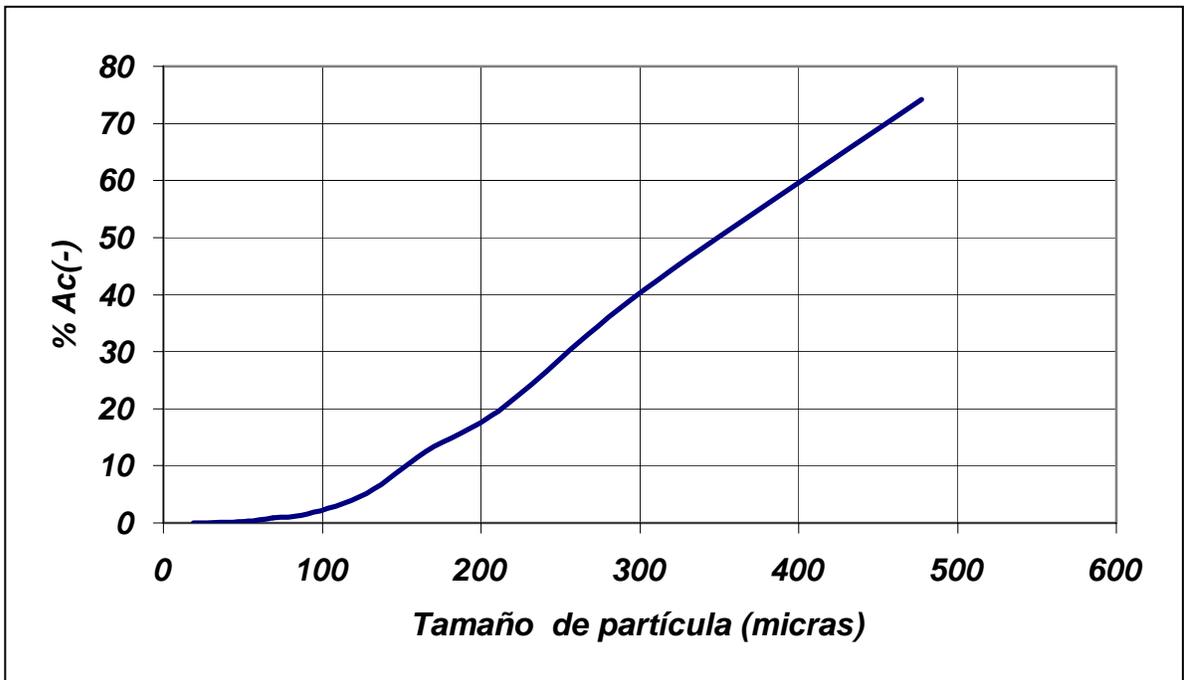
E1. Ensayo 1.



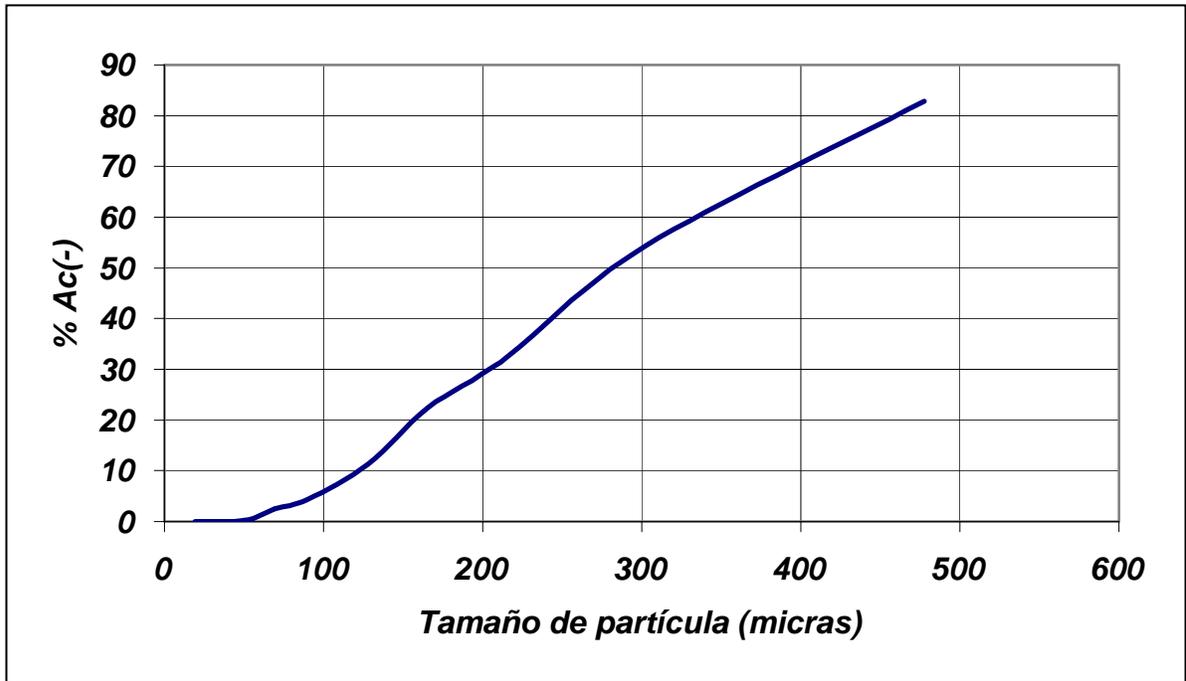
E2. Ensayo 2.



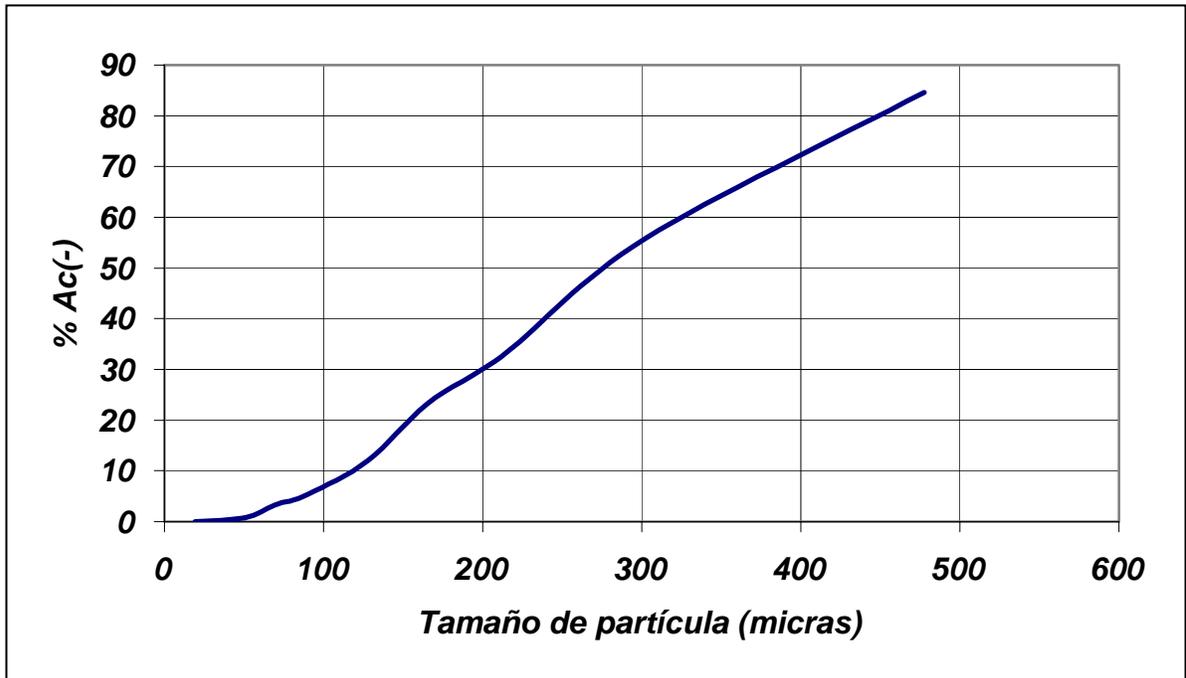
E3. Ensayo 3.



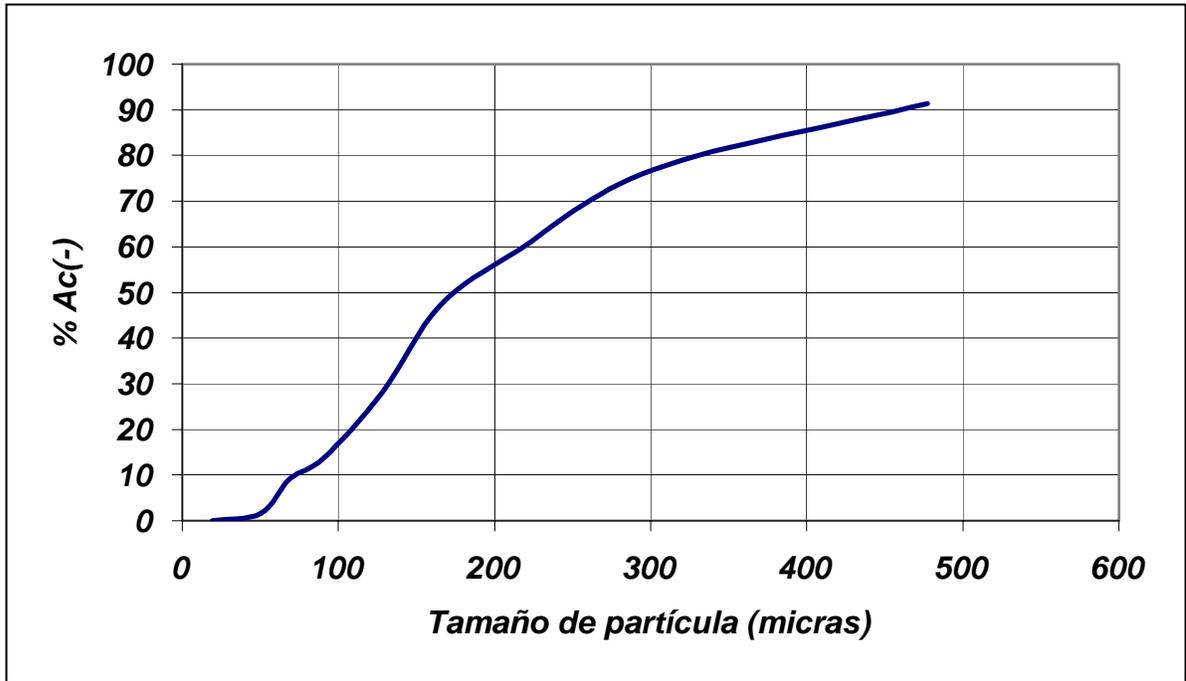
E4. Ensayo 4.



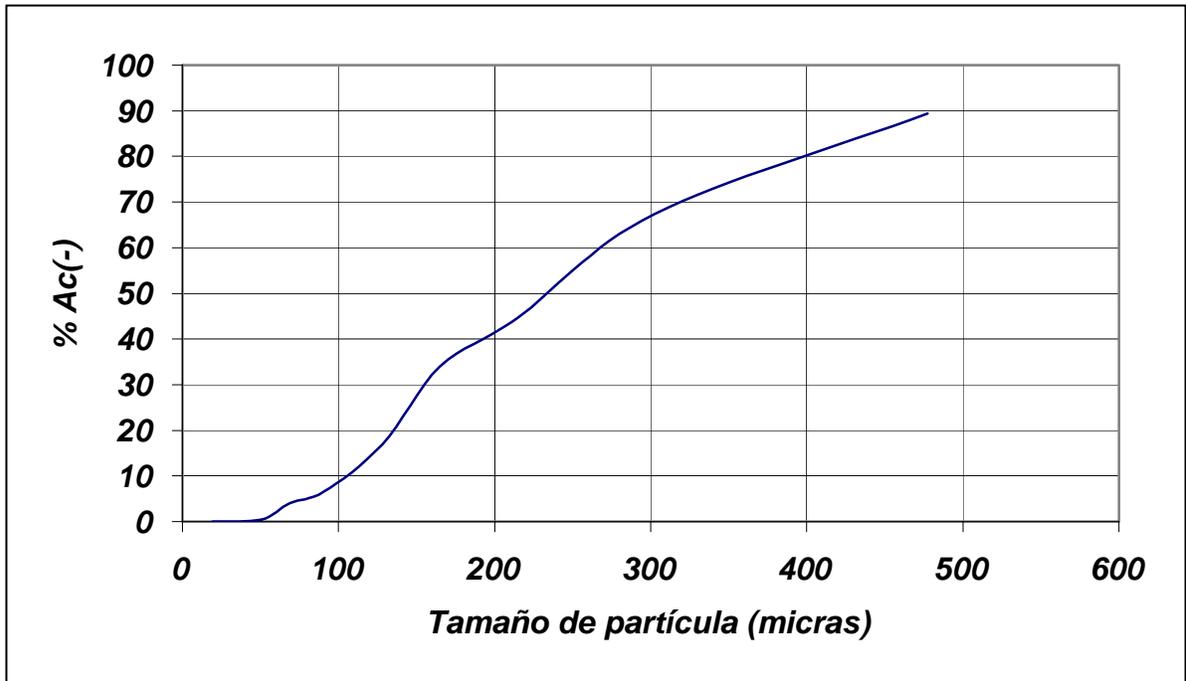
E5. Ensayo 5.



E6. Ensayo 6.



E7. Ensayo 7.



E8. Ensayo 8.