



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO.

FACULTAD DE QUÍMICA

AMPLIACIÓN Y PROFUNDIZACIÓN DEL
CONOCIMIENTO.

CONTROL DE LOS PROCESOS DE
FABRICACIÓN DE POLVO METÁLICO DE
ACUERDO CON LA NORMA ISO 9001:2015
Y OTROS REQUISITOS APLICABLES.

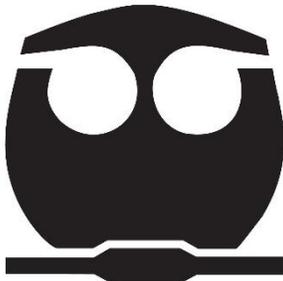
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO.

PRESENTA:

DIEGO OMAR RODRIGUEZ REGALADO.

ASESOR:

M. en G.I. Dulce María Mariles Aguirre



Ciudad Universitaria, CD.MX.

2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: M en C.I. Mariles Aguirre Dulce María.

VOCAL: Profesor: I.C.A. Hernández Trejo Esteban.

SECRETARIO: Profesor: I.Q. Aguilar Bernal Julio.

1er. SUPLENTE: Profesor: Samano Castillo José Sabino.

2^o SUPLENTE: Profesor: M. en A.I. Zanelli Trejo Alejandro

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUIMICA

ASESOR DEL TEMA: _____



M. en G.I. Dulce María Mariles Aguirre

SUSTENTANTE: _____



Diego Omar Rodríguez Regalado.

1. índice

Contenido

2.	Introducción	2
3.	Objetivo.....	3
4.	Generalidades y antecedentes	3
4.1	Estandarización	3
4.2	Organizaciones para la estandarización.....	4
4.2.1	Dirección General de Normas	5
4.2.2	Las NOM y NMX	5
4.2.3	Organización Internacional de estandarización ISO	6
4.2.4	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM)	7
4.3	La industria de polvos metálicos.....	8
5.	Proceso de fabricación de polvos metálicos	9
5.1	Variables del proceso	11
5.2	Atomizadores de gas horizontales	12
5.3	Atomizadores de gas verticales	13
5.4	Atomizadores de agua	15
6.	Establecimiento de controles en el proceso de atomización	18
6.1	Determinación de los requisitos para los polvos metálicos y servicios con respecto a la cláusula 8.2 de la norma ISO 9001:2015.....	21
6.2	Establecimiento de criterios y control para los procesos de producción del polvo con respecto a la cláusula 8.5 “Producción y provisión del servicio”	22
6.2.1	Criterios para la atomización.	23
6.2.2	Criterios para secado.	26
6.2.3	Criterios para recocido.....	27
6.2.4	Criterios para Limpieza (molienda).	32
6.2.5	Criterios para Tamizado.	37
6.2.6	Criterios para Mezclado.	37
6.2.7	Criterios para pruebas de caracterización.	38
7.	Establecimiento de criterios en pruebas de calidad para la liberación del producto con respecto a la cláusula 8.6 “liberación de los productos y servicios” de la norma ISO 9001:2015.	43
7.1	Distribución de tamaño de partícula ASTM B214-22.....	43
7.2	Densidad aparente por ASTM B212-13.....	47

7.3	Velocidad de flujo por ASTM B213-13	48
7.4	prueba de compresibilidad por ASTM B331-16	49
7.5	liberación de los productos y servicios.	52
7.6	salidas no conformes	53
8.	Conclusiones.	54
	Referencias.....	55

2. Introducción

La implementación de un sistema de calidad en los procesos es muy importante para cualquier industria, ya que disminuye la queja o inconformidades de los clientes, devoluciones del producto y reprocesamiento que claramente tendrá un costo adicional a la empresa, lo que se traduce económicamente en pérdidas.

El primer paso para la implementación de calidad en el proceso de obtención de polvos metálicos sería determinar el alcance de nuestra influencia en el sistema de gestión de la calidad, es decir, desde que punto podemos tomar decisiones y acciones para poder asegurar nuestro objetivo, que es ofrecer un producto de calidad.

Para alcanzar la calidad del producto y posicionarlo en el mercado es necesario llevar a cabo un control de los procesos, en los cuales tenemos que poner una mayor atención y cuidado; trazando un diagrama de flujo de todas las actividades que realizaremos y documentado cada una de ellas con sus respectivos requisitos aplicables.

Los beneficios del sistema de gestión de calidad son entre otros el cumplimiento de los requisitos del producto y/o servicio y una mayor satisfacción del cliente, que es la razón principal de la norma ISO 9001:2015; así mismo nos ayuda a abrir nuevos mercados o lograr un mejor posicionamiento de nuestro producto o empresa.

3. Objetivo

El objetivo de este trabajo es desarrollar parte de los procesos requeridos en un sistema de gestión de calidad para obtener un producto, en este caso, polvo metálico, que cumpla con los requisitos establecidos, las necesidades del cliente y aportar un valor agregado.

4. Generalidades y antecedentes

4.1 Estandarización

Se entiende por estandarización a la acción de “unificar las características de un producto, servicio o proceso con la finalidad de establecer y basarse en una referencia universal reproducible”¹.

Esta referencia universal, también llamada patrón, se documenta para tener una serie de características que deben tener dichos productos, servicios y/o procesos, además de instrucciones específicas para poder llevarlo a cabo, a estos documentos se les llama normas de estandarización o normalización.

Los objetivos principales de la estandarización es la de disminuir las variaciones y diferencias en las características o especificaciones de dicho producto, servicio y/o proceso, así como la resolución de algunos problemas.

Otros objetivos relacionados son: la reducción de los costes directos e indirectos y la agilización del proceso cuyo beneficio está enfocado a realización correcta de trabajo.

¹ Secretaría de Economía. (2019, 23 febrero). ¿Sabes que es la normalización? Gobierno de México. Recuperado 14 de marzo e 2023, de <https://www.gob.mx/se/articulos/sabes-que-es-la-normalización-192107?idiom=es>

4.2 Organizaciones para la estandarización

En el capítulo anterior se explicó que las normas son referencias universales documentadas que son escritas por organizaciones tanto nacionales como internacionales. Dentro de las primeras podemos encontrar la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM), el CODEX Alimentarius y quizá la más importante de todas, la Organización Internacional de estandarización o ISO por sus siglas en inglés.

“En México existen un total de 10 organismos nacionales de normalización:

- *Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación, S.C. (NORMEX)*
- *Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMNC)*
- *Asociación de Normalización y Certificación, A.C. (ANCE)*
- *Instituto Nacional de normalización Textil, A.C. (INNTEX)*
- *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE)*
- *Normalización Y Certificación Electrónica, A.C. (NYCE)*
- *Consejo para el Fomento de la Calidad de la Leche y sus derivados, A.C. (COFOCALEC)*
- *Centro de Normalización y Certificación de Productos, A.C. (CNCP)*
- *Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO)*
- *Organismo Nacional de Normalización de Productos Lácteos (ONNPROLAC)*

Su función es la de elaborar y expedir Normas mexicanas en las materias que sean registrados por la Dirección General de Normas; permitiendo la participación de todos los sectores interesados en los comités; así como de las dependencias y entidades de la administración pública federal competente.”²

² Diaz Carrillo, E. (s.f.). SISTEMAS NORMATIVOS. [Diapositivas; electrónico]

4.2.1 Dirección General de Normas

“Es una unidad administrativa dependiente de la Subsecretaría de Competitividad y Normatividad de la Secretaría de Economía, es responsable de coordinar el sistema de normalización y evaluación de la conformidad, con base en lo dispuesto en Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, para fomentar la competitividad de la industria y el comercio en el ámbito nacional e internacional. Dentro de algunas de sus actividades se encuentran”³:

- Autorización de patrones nacionales de medición.
- Aprobar el modelo o prototipo de instrumentos de medición y de patrones sujetos a Norma Oficial Mexicana
- Certificación de NOM cuando no existe organismos de certificación acreditados y aprobados.
- Expedir NOM en materia de metrología.
- Autorización de la trazabilidad hacia patrones nacionales y extranjeros.

4.2.2 Las NOM y NMX

“*La Norma Oficial Mexicana (NOM)* es una regulación técnica de aplicación obligatoria expedida por las Autoridades Normalizadoras o dependencias gubernamentales con la cual se fomenta los estándares mínimos de calidad para el desarrollo económico y la protección de los objetivos legítimos de interés público al instaurar reglas, denominaciones, características aplicables a un producto, servicio o proceso, conforme a las finalidades establecidas en el artículo 40 de la Ley Federal sobre la Metrología y Normalización”⁴.

³ Wikiwand- Dirección General de Normas (México). (s.f.-b). Wikiwand. Recuperado 16 de marzo de 2023.

⁴ Diaz Carrillo, E. (s.f.). SISTEMAS NORMATIVOS. [Diapositivas; electrónico]

“La Norma Mexicana (NMX) es una regulación técnica de carácter Voluntario, que sirve como referencia para determinar la calidad de los productos y servicios para la protección y orientación de los consumidores; promovidas por el sector privado a través de los Organismos Nacionales de Normalización según su competencia; Mientras que para las áreas no cubiertas por las ONN, las normas son realizadas y promovidas por la Secretaría de Economía a través de sus Comités Técnicos de Normalización Nacional”⁵.

4.2.3 Organización Internacional de estandarización ISO

Ubicada en Ginebra, Suiza y fundada en 1946 es un organismo independiente y no gubernamental con una membresía de 167 Organismos Nacionales de Normalización (ONN).

“La ISO está conformada por el Consejo ISO y por la junta de dirección técnica que revisan todos los aspectos de la norma ISO incluidos el alcance que tendrá, definiciones y contenido consensuado entre los miembros para su aprobación y publicación”⁶.

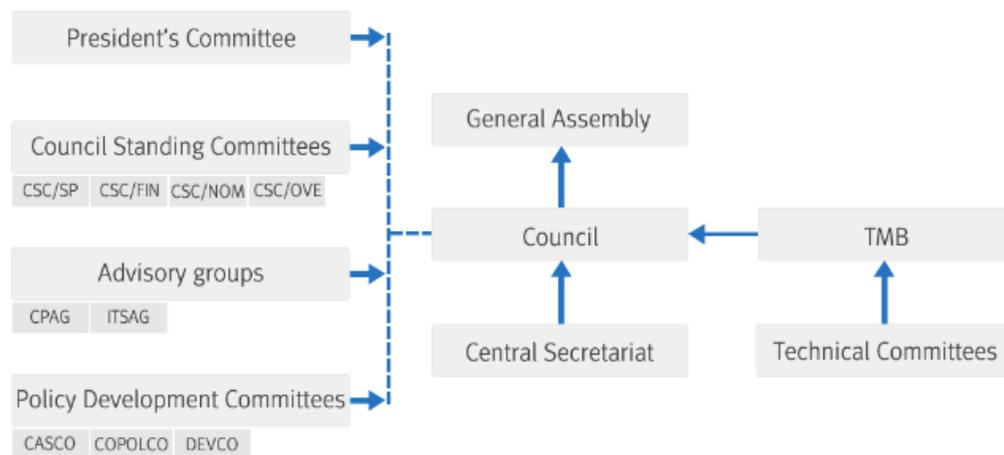


Figura 1. Estructura de gobierno de la ISO como organización para la creación de normas. ISO Governance Structure [Diagrama], ISO org, <https://www.iso.org/structure>

⁵ Wikiwand- Dirección General de Normas (México). (s.f.-b). Wikiwand. Recuperado 16 de marzo de 2023.

⁶ ISO. (s.f.). ISO – About us. Recuperado 15 de marzo de 2023, de <https://www.iso.org/about-us.html>

Como se observa en la Figura 1 el primer bloque es el consejo ISO y está conformado por:

- El presidente del comité: quien asesora al Consejo sobre asuntos decididos por el Consejo.
- Comités permanentes del consejo: abordan asuntos relacionados con finanzas, estrategia y política, nominaciones para puestos de gobierno y supervisan las prácticas de gobernanza de la organización.
- Grupo Asesor: proporciona asesoramiento sobre asuntos relacionados con la política comercial de ISO y la tecnología de la información.
- Comités de desarrollo de políticas.

En el otro extremo del diagrama se encuentra la junta de dirección técnica TMB quien también es responsable de los comités técnicos y el cuál reporta al consejo ISO el desarrollo de las normas y cualquier consejo asesor estratégico creado sobre asuntos técnicos.

4.2.4 Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM)

“Ubicada en Pennsylvania, Estados Unidos, la ASTM es una organización que desarrolla estándares y métodos de pruebas internacionales de una amplia gama de materiales en industrias tales como la energética, la aviación, la fabricación avanzada (automatizada), la construcción, la ambiental entre otras.

Posee alrededor de 13000 estándares que operan a nivel mundial y es uno de los principales miembros de la ISO que contribuyen en el desarrollo de sus normas”⁷.

⁷ ASTM International. (s.f.). detailed overview. Recuperado 14 de marzo de 2023, de <https://www.astm.org/about/overview/detailed-overview.html>

En la industria metalúrgica, la ASTM tiene una gran importancia, ya que, para toda prueba en materiales metálicos y sus materias primas, se utilizan las normas expedidas por esta organización. Tanto las metodologías como para las propiedades mecánicas que deben de cumplir, con lo cual se alcance un cierto grado aceptable de calidad.

4.3 La industria de polvos metálicos

La metalurgia de polvos es una industria la cual se enfoca en la producción tanto de partículas metálicas como de objetos terminadas a partir de los obtenidos.

La utilización polvos en la fabricación de piezas es importante por su capacidad de adoptar formas complejas y para mezclarse con metales que no se combinan con facilidad o que tienen una alta temperatura de fusión. Esto se debe a que las partículas de polvo son muy finas y su forma es esférica, lo que les permite comportarse de manera similar a un líquido. Al aprovechar estas propiedades, se pueden crear piezas con mayor precisión y con características únicas.

La compactación es muy relevante para la fabricación de cualquier tipo de objeto, ya que nos permite darle una forma definida y dimensiones específicas a nuestra materia prima. Al usar este proceso, podemos modelar con mayor precisión al polvo y obtener objetos con características específicas

“Aunque la pieza ha sido prensada no posee por sí sola las propiedades mecánicas necesarias para cumplir su función. Por esta razón, se somete a un proceso adicional llamado sinterización. Durante dicha fase, las partículas prensadas se consolidan, lo que aumenta la resistencia de la pieza a la fractura y a la deformación. Este tratamiento es esencial, ya que

le otorga al objeto las características necesarias para cumplir su función de manera adecuada”⁸

La producción de polvos metálicos de geometría regular como lo es la esférica, es muy deseada, ya que estos se acomodan de tal modo que los espacios entre las partículas al ser prensadas son muy pequeños, lo que disminuye las imperfecciones y defectos que se puedan presentar en la pieza.

5. Proceso de fabricación de polvos metálicos

Existen varios métodos de obtención como, por ejemplo: métodos químicos, electrolíticos, de Atomización, de Evaporación y mecánicos; éstos últimos son bastante usados por su alto rendimiento, pero sacrificando un poco la calidad del producto final ya que la forma de las partículas es de carácter irregular.

Sin embargo, el proceso de atomización no deja de ser un método de producción con buenos rendimientos, ya que algunas unidades de atomización pueden producir hasta 400 Kg/min de polvo.

En este caso nos centraremos en el método de atomización ya que, mediante éste podemos obtener una forma regular o esférica, la cual aprecia el valor del producto como se abordó en el capítulo 4.3

El método parte de la premisa que “cualquier material que sea capaz de fundirse se puede convertir en polvo por desintegración del líquido. Aparte de la reactividad química, que llega a requerir una atmósfera o materiales especiales, el proceso de atomización es independiente de las propiedades físicas y mecánicas normales asociadas con su estado sólido”. (German, R. M. 2005, *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*, p. 45[Electrónico]).

⁸ Upadhyaya, A., & Upadhyaya, G. S. (2010). Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials [Impreso]. Baldev Raj.

“El procedimiento básico empleado es forzar el fluido de fusión a través de un orificio, ubicado en el fondo de un crisol, e incidir la corriente de gas o líquido en la fundición emergente. Mucho depende del diseño exacto del orificio. Puede inducir turbulencia en la masa fundida, lo que atomiza el metal y permite que el gas o líquido que incide reduzca el tamaño de la partícula aún más rápido”. (Upadhyaya, A., & Upadhyaya, G. S. (2010). *Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials* p. 45 [Impreso]. Baldev Raj.)

“La despresurización del gas utilizado a la salida de la boquilla dispersa el chorro de metal fundido en un cono hueco delgado debe estar sobrecalentado para evitar una solidificación prematura. El líquido continúa desintegrándose debido a las fuerzas de corte del gas que se expande “(German, R. M. (2005), *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing* (p.72) MPIF.)

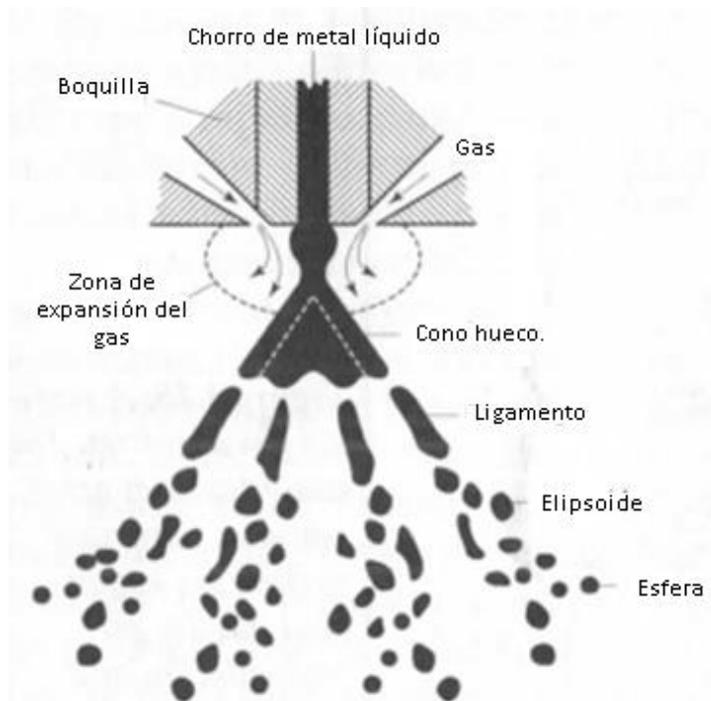


Figura 2. Formación del polvo metálico por la rotura del chorro fundido y la rápida expansión del gas a la salida de las boquillas y sus 3 etapas (ligamento, elipsoide y esfera) German, R. M. (2005) [Esquema], *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing* (p.72) MPIF.

5.1 Variables del proceso

Debemos tener en cuenta las principales variables del proceso que dependen del tamaño de la partícula final como lo son:

- Baja viscosidad del metal
- Baja tensión superficial del metal
- Metal super calentado
- Diámetro de la boquilla pequeño
- Baja velocidad de alimentación del metal
- Alta presión para la atomización
- Alto volumen de agente atomizante
- Alta velocidad del agente atomizante
- Alta viscosidad del agente atomizante
- Flujo de metal corto
- Longitud del jet corta.
- Angulo de vértice óptimo

Por otro lado, también se puede controlar la forma de las partículas de los polvos, ya que esta forma es favorecida por:

- Alta tensión superficial del metal
- Rango de fusión cercano
- Alta temperatura de vaciado
- Gases inertes para la atomización
- Baja velocidad de jet
- En el caso de atomización con agua, Ángulo de ápices largos⁹.
- Trayectorias de vuelo largas

⁹ En geometría un ángulo de ápice Largo es aquel que se forma entre 2 lados iguales de un triángulo isósceles, por lo que en este contexto sería el ángulo que forman las paredes de la boquilla del jet por donde pasa el gas para la atomización.

El método de atomización por gas se puede dividir en 2 ramas en función del fluido utilizado para realizarlo, la primera emplea un gas inerte, lo que significa que no reacciona con el metal que se pone en contacto y evita su oxidación.

Los más comunes son: el aire, nitrógeno, helio y argón, mientras que la segunda emplea agua para realizar dicha acción. El metal fundido se desintegra por la rápida expansión del gas a la salida de una boquilla, como si de un perfume o aerosol se tratase, transformando el chorro de metal en diminutas gotas que son rápidamente solidificadas.

En la producción de polvos mediante el proceso de atomización, se emplean metales muy reactivos. Para evitar la oxidación de estos durante la solidificación, se utilizan gases inertes. De esta manera, se garantiza que el producto final sea polvo en su estado original, en lugar de obtener óxidos metálicos.

En segunda, se utilizan para prevenir una atmósfera explosiva, ya que algunos pueden causar una explosión por acumulación de partículas suspendidas, por lo que debemos tener un cuidado especial al producir polvos de este tipo.

“La configuración de los equipos varía con respecto al mecanismo de alimentación del metal fundido y la sofisticación de las cámaras de colección” (German, R. M. 2005, *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*, p. 45[Electrónico]).

5.2 Atomizadores de gas horizontales

Por un lado, tenemos a los atomizadores horizontales, usados para metales de baja temperatura de fusión, su mecanismo es el de crear un sifón mediante la alta velocidad del gas que emerge a la salida de la boquilla, succionando el metal que se encuentra en estado líquido en el crisol de fusión.

Mientras las partículas están en vuelo dentro de la cámara de colección, van perdiendo calor y se van solidificando, las cuales son atrapadas en un filtro, permitiendo que el gas fluya y escape.

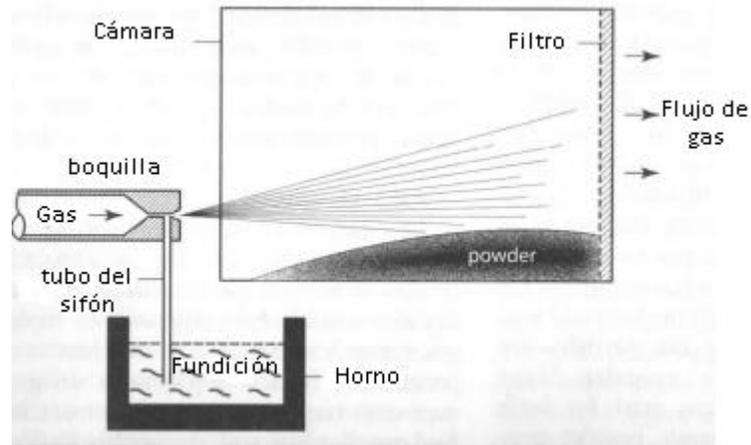


Figura 3. Diagrama de equipo de atomización horizontal para metales de baja temperatura de fusión. German, R. M. (2005) [Esquema], Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing (p.70) MPIF.

Este tipo de atomizadores son utilizados para producir aleaciones o metales cuya temperatura de fusión es baja.

5.3 Atomizadores de gas verticales

Para producir polvo metálico con una alta temperatura de fusión, se utiliza el método de atomización vertical, que implica el uso de dos crisoles, uno encima de otro, dentro de una cámara sellada y llena de gas inerte. De esta manera, se evita la oxidación del metal que se está fundiendo. El primero lleva al metal a estado líquido, después se vierte en el segundo crisol que eleva aún más la temperatura con ayuda de un sistema de inducción magnética y así mantener en estado líquido super calentado la materia prima.

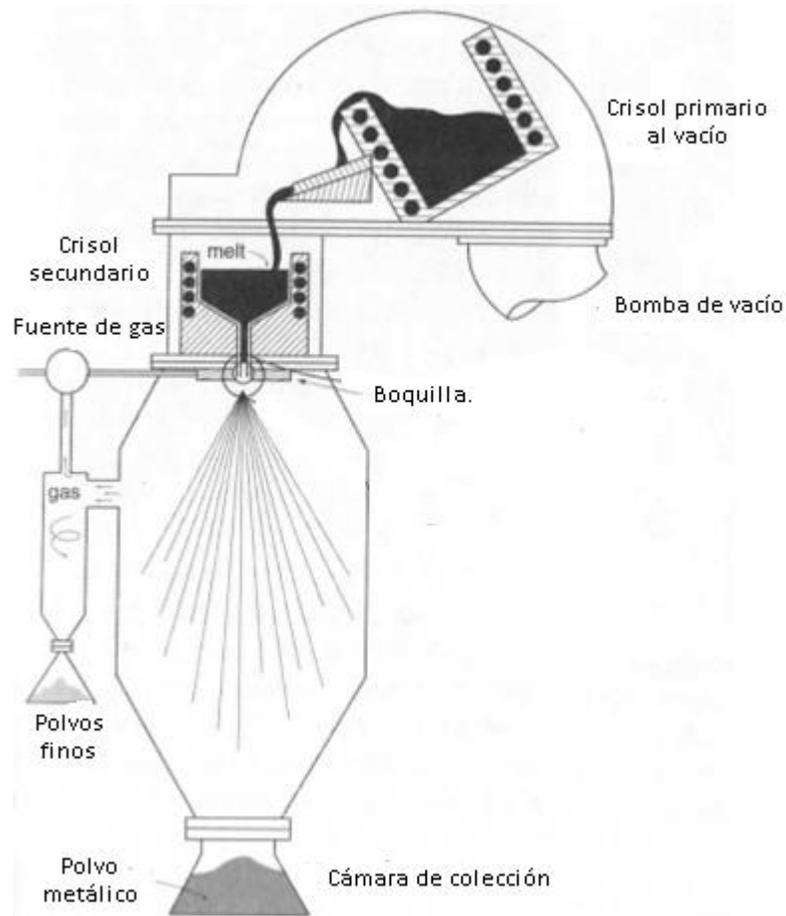


Figura 3. Diagrama de equipo de atomización vertical para metales de alta temperatura de fusión. German, R. M. (2005) [Esquema], Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing (p.71) MPIF.

Es fundamental evacuar el gas para evitar contrapresiones que afecten la movilidad del gas y retrasan su salida, provocando alteraciones en el proceso de atomización. Además, estas llegan a generar un fenómeno conocido como golpe de ariete, que puede dañar la tubería que transporta el fluido y el equipo empleado.

Para esta configuración de atomizador vertical es necesario incorporar un separador ciclónico, ya que permite reciclar el gas y su salida mientras deja atrás las partículas finas de polvo y las separa de las más grandes, cabe mencionar que la distribución del tamaño es amplia, pero comúnmente se limita a 10 μm .

La reducción de dimensión en la atomización del material líquido depende en gran medida de la viscosidad del metal fundido y la temperatura de sobrecalentamiento.

Al aumentar esta última, se logra disminuir dicha propiedad, lo que permite un mayor tiempo de solidificación y ayuda a que las gotas fundidas se formen en esferas en lugar elipsoides o partículas irregulares.

Por otro lado, la turbulencia cercana a la boquilla donde se expande el gas puede acarrear pequeñas partículas en vuelo, las cuales colisionan con gotas más grandes del material fundido causando una rugosidad en la esfera o que no sea lisa su superficie en su totalidad, lo que no se desea.

5.4 Atomizadores de agua

Como lo hemos mencionado en el capítulo 5.1 “Variables del proceso”, el método lo podemos dividir en 2 ramas, ya abordamos la variante por gas, por lo que en esta sección hablaremos sobre la producción de polvos por agua o líquidos.

Este tipo de atomizadores se usan para metales de baja reactividad como lo son los aceros y los hierros fundidos, contrario a los equipos de gas que utilizan gases inertes, evitando la reactividad de estos y previniendo sus consecuencias.

En este tipo de atomización no hay que preocuparse por generar una atmosfera inerte o que el producto se convierta en óxido, tampoco se necesita de una bomba de vacío que extraiga el gas para reciclarlo. Debido a que los polvos que se fabrican como el acero inoxidable y de alta aleación, forman una fina capa de óxido que lo recubre y a su vez protege el interior del material previniendo la corrosión¹⁰; por lo que algunos autores dicen que estos metales ya se encuentran en este estado.

En resumen, la fina capa de oxido formada en la superficie de estas aleaciones protege al material de la corrosión.

Sin embargo, por parte de los hierros fundidos, esto no ocurre de tal manera, ya que éstos se caracterizan por su contenido de carbono que, a diferencia de los

¹⁰ *La corrosión es el deterioro de un material a causa de la interacción química con su entorno. Es un proceso natural en el que los metales convierten su estructura en una forma más estable químicamente, como óxidos, hidróxidos o sulfuros.*

aceros, es a partir de 2.11% y de Silicio hasta un 3% en peso, entre otros elementos como son manganeso, fósforo y azufre. El contenido elevado de carbono de estas fundiciones les proporciona cierta protección, puesto que, al reaccionar con el oxígeno, se forma CO, que puede disolverse en el material, evitando la formación de óxidos sólidos en su superficie. Además, es importante no descartar el contenido de Silicio que también es relevante.

“Las dependencias de temperatura de las energías libres de formación de SiO₂ y CO son diferentes para las dos especies. Por encima de 1535 °C, el CO es el compuesto más estable; por debajo de esta, lo es el SiO₂. Esto se puede observar en la superficie de una masa de hierro líquido que parece limpia por encima de los 1535 °C y, sin embargo, desarrolla una cubierta de escoria a temperaturas más bajas” (*ASM Handbook: Casting*, 1990).

En general la formación de óxidos sólidos en la superficie de las gotas, disminuyen la energía superficial y ocasionan dificultades para que la partícula tome la forma de una esfera.

Durante el proceso, uno o varios chorros de agua se bombean y chocan con la masa fundida; transportando una alta cantidad de energía térmica con el metal que resulta en un enfriamiento muy rápido. Esto acelera el proceso de formación de las partículas en esferas, lo que genera una superficie rugosa e irregular en los polvos.

Después de obtener el producto, se necesitan realizar procesos adicionales debido a que el polvo producido contiene alta humedad. En primer lugar, se pasa por un secador evaporando el agua que se encuentra junto con él. A continuación, se lleva a cabo un recocido¹¹ con el objetivo de disminuir su dureza. Para ello, el metal se calienta y se mantiene a una determinada temperatura, lo que provoca la transformación por difusión de la fase martensita en otras fases más blandas como

¹¹ El recocido es un tratamiento térmico que tiene por objeto el ablandamiento del material o la relajación de tensiones en el mismo.

la bainita¹² y la perlita¹³. Además de esta, se lleva a cabo en paralelo un fenómeno denominado recristalización, en el cual “se forman nuevos granos equiaxiales¹⁴ y libre de tensiones en las regiones de la microestructura sometidas a dicha condición. Estos crecen al mismo tiempo hasta que llegan a constituir la totalidad de la microestructura” (Shackelford et al., 2005).

Recordemos que, en el proceso principal, la solidificación de las gotas de la masa fundida se lleva a cabo muy rápido debido a la alta transferencia de energía térmica entre el agua y el metal. Cuando se somete a esta acción, conlleva a que el metal se temple¹⁵ y se endurezca, lo que limita su utilidad en la producción de piezas prensadas. Esto se debe a que su alta dureza impide su deformación, lo que hace que sea difícil someterlo a esta acción, dificultando la consolidación de la pieza fabricada.

Si el metal o aleación reacciona levemente con el agua produciendo óxidos, que pueden ser perjudiciales, es necesario realizar molienda para limpiar las partículas y separarlos de la superficie. De esta manera, se evita la contaminación que pudiese afectar la calidad del material.

Este procedimiento se utiliza no solo en la producción de ciertos tipos de polvos, sino también como un proceso de limpieza para las partículas metálicas. Se logra mediante el uso de bolas en el interior de un molino, las cuales aplican fuerzas de impacto, desgaste y compresión que eliminan los óxidos presentes en el producto.

Después de limpiar el polvo metálico, se tamiza para separar las partículas según su tamaño. A continuación, se puede llevar a cabo el proceso opcional de mezclado, dependiendo si el cliente requiere la adición de algún aditivo o lubricante al producto. Dichos procesos se plasman en la siguiente figura.

¹² Microestructura de ferrita y cementita extremadamente fina con forma de pluma de ave.

¹³ Microestructura eutectoide constituida por dos fases, hierro y carburo de hierro también llamado cementita (Fe_3C)

¹⁴ Son cristales cuyos ejes tienen aproximadamente la misma longitud, los cuales están orientados aleatoriamente que se forman en el centro de una fundición y tienen una forma más o menos redonda

¹⁵ Tratamiento térmico que se le da a los aceros para elevar su dureza, enfriando rápidamente el material desde la temperatura de temple hasta temperatura ambiente, lo que ocasiona que la fase de austenita se transforme sin difusión del carbono en martensita, una solución sólida de C en Fe de carácter metaestable

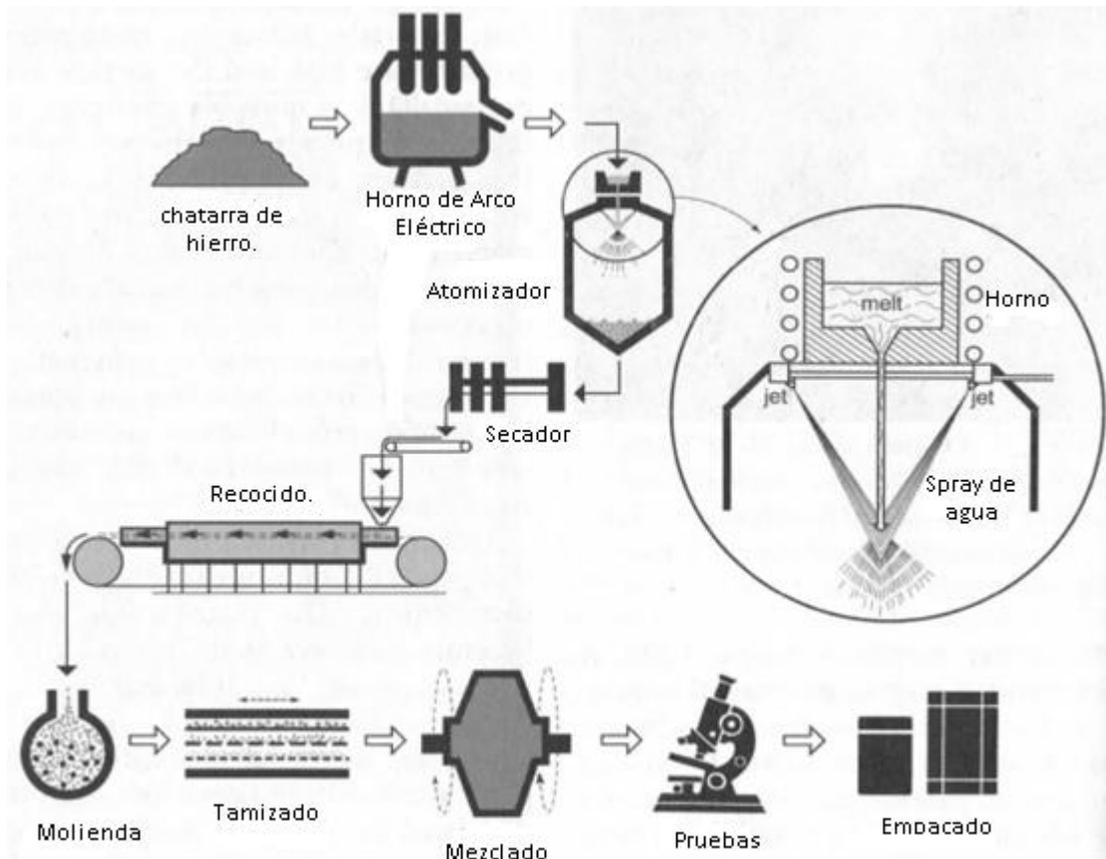


Figura 4. Diagrama de flujo de los procesos adicionales involucrados en la producción de polvo mediante la atomización por agua. Adaptación de Figura German, R. M. (2005) [Esquema], Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing (p.76) MPIF.

6. Establecimiento de controles en el proceso de atomización

La norma ISO 9001:2015, en su cláusula 8 “Operación”, nos habla sobre la planificación, control e implementación de procesos en su apartado 8.1, con ello debemos determinar cuáles son necesarios para el sistema de gestión de calidad y su aplicación como se observa en los incisos de la cláusula 4.4.1

Iniciamos determinando a) las entradas requeridas y salidas esperadas de estos procesos, por lo que nos ayudaremos de un diagrama de tortuga.

Producción de polvo metálico.

¿Qué?

Recursos: Personal, E.P.P

Materiales: Metal de alta pureza, gas inerte o agua como medio para atomizar.

Infraestructura: Planta o Nave industrial

Equipamiento: Crisol, Dispositivo de Atomización, Bombas de gas, Bombas de agua, Dispositivo de filtrado y secado, ciclador, torre de enfriamiento, horno de recocido, molino, tamizadora, mezcladora y equipo de medición.

Entradas.

1. Orden del cliente (especificaciones como tamaño de partícula, tipo de metal o aleación y cantidad)
2. Materia prima (metal puro o combinación de metales), gas o agua, electricidad

Mediciones y evaluaciones.

1. Kg de polvo producido por mes vs Kg de polvo vendido al mes
2. Número de clientes con respecto al mes pasado

Personal relacionado con el proceso y partes involucradas.

1. Personal de ventas (Toma el pedido con las especificaciones del cliente).
2. Operario carga la cantidad de metal a producir en el crisol.
3. Operario carga el polvo para recocido y limpieza.
4. Personal de calidad recibe el polvo saliente del proceso de atomización y realiza pruebas de caracterización.
5. Personal coloca el polvo del lote producido en la empacadora.
6. Personal de almacén lo lleva a bodega.
7. Personal de venta solicita a almacenista el producto de la orden para su entrega al cliente.

Salidas.

Orden completada con las especificaciones solicitadas.
Polvo metálico

Procesos de soporte (Documentos de soporte o normas).

1. ASTM B215-15
2. ASTM B214-22
3. ASTM B212-13
4. ASTM B213-13
5. ASTM B331-16

De igual modo dentro de la información proporcionada por este, cubrimos los incisos:

b) determinar la secuencia e interacción de estos, la cual se encuentra en el recuadro “personal relacionado con el proceso y partes involucradas, en donde observamos las acciones o subprocesos que se requieren para la producción de nuestro producto.

Para el inciso d) “*determinar los recursos necesarios*”, la información correspondiente se encuentra en el recuadro de Entradas.

Con respecto al e) “*asignar las responsabilidades y autoridades para estos procesos*”. Como lo indica su nombre, debemos delegar personal que se encargue de cada uno de los subprocesos u “operaciones unitarias”¹⁶.

En este caso, es necesario asignar responsables y autoridades de acuerdo con el tipo de metal que se va a producir. Teniendo en cuenta lo mencionado en el Capítulo 5 “Proceso de fabricación de polvos”, podemos dividirlo en dos ramas principales: aquella que utiliza agua y la que usa gases inertes. A su vez, cada una se subdivide en atomizadores horizontales y verticales.

La razón por la que se divide radica en el hecho de que, en la primera categoría, se emplea para la fabricación de aceros inoxidables o hierros fundidos. Estos materiales, como se muestra en la Figura 4, requieren procesos adicionales a la atomización. Antes de esta, se llevan a cabo etapas previas como la fundición y el ajuste de la concentración química de la aleación, es decir, sus “elementos aleantes”¹⁷ en un horno de arco eléctrico, o posterior a la atomización, como lo es la etapa de secar y limpiar el producto.

Para la producción de polvo por agua, los responsables de los procesos son: el jefe del área de fundición en horno de arco eléctrico, quien se encarga de realizar

¹⁶ Proceso físico o químico que se lleva a cabo en una sustancia o mezcla para lograr un cambio específico en su composición, estructura o propiedades físicas. Se consideran unitarias por que se utilizan como bloques básicos en la ingeniería de procesos que se pueden combinar

¹⁷ Elementos químicos que pueden ser metales o no metales agregados en pequeñas cantidades a una aleación para mejorar o modificar sus propiedades físicas como dureza, ductilidad, corrosión... etc

la primera fusión y ajuste de la composición química del acero que se está produciendo, así como del visto bueno de la recepción de la materia prima.

El encargado del área de atomización, quien recibe la carga fundida del horno de arco eléctrico en el crisol del equipo y el operario, establece las variables del proceso óptimas para tener un producto con las características deseadas.

El encargado del área de tratamiento térmico quien recibe el polvo producido y lo mete al horno de recocido estableciendo la temperatura y tiempo óptimos para dicho proceso.

El encargado del área de limpieza por molienda quien es responsable de establecer las condiciones de operación del molino y entregar un polvo libre de óxidos en su superficie.

El encargado del Área de tamizado, quien es responsable de la separación del producto por tamaños de partícula con ayuda de equipo especializado

El encargado del Área de caracterización y pruebas de calidad mediante normas ASTM o alguna NOM/NMX.

El encargado del Área de Mezclado, cuando el cliente requiere la adición de algún otro material tales como lubricantes o algún tipo de aditivo

El encargado del Área de empaclado y almacenamiento. Quien revisa los paquetes en la maquinaria y a su salida, verificando que su descripción sea correcta y lo lleva al depósito o bien lo envía al encargado o equipo de ventas para su entrega al cliente.

Una vez realizado esto, procederemos a revisar y verificar los incisos de la cláusula 8 de la norma ISO 9001:2015

6.1 Determinación de los requisitos para los polvos metálicos y servicios con respecto a la cláusula 8.2 de la norma ISO 9001:2015

Al solicitar el producto, el cliente proporciona los requisitos necesarios de los polvos metálicos. Estos incluyen el tamaño aproximado de partícula y

el tipo de metal o aleación que va a emplear para cumplir con sus necesidades específicas. Es importante tener en cuenta que dichos polvos se utilizan en diversas industrias como la automotriz, la aeroespacial, la médica, la electrónica, la de construcción, etc. Por lo que los requisitos o características varían en función de los usos que cada industria le vaya a dar.

Como nos lo indica la sub-cláusula *8.2.1” comunicación con el cliente”* en el inciso b) debemos tratar las consultas, los contratos o los pedidos, incluyendo los cambios, para ello no apoyaremos de una orden adicional que llevará por escrito los cambios en la composición como ajuste de ella, también se puede tratar la omisión de la adición de lubricantes o aditivos a la mezcla del polvo metálico.

Por último, el inciso e) de la misma sub-cláusula; las acciones de contingencia se le proporcionarán al cliente junto con la hoja de liberación de su producto (orden de trabajo completada) y las precauciones que debe tener durante la manipulación, dichas precauciones pueden estar en el etiquetado del producto o en la ficha técnica del producto, así como el equipo de protección personal.

6.2 Establecimiento de criterios y control para los procesos de producción del polvo con respecto a la cláusula 8.5 “Producción y provisión del servicio”.

Estos criterios los estableceremos en función de las características solicitadas por el cliente y a través de las variables del proceso mencionadas en el Capítulo 5.1. Designando también personal competente y calificado, así como de criterios de procesos previos y posteriores, iniciando con:

6.2.1 Criterios para la atomización.

- a) La materia prima, se considera la pureza del metal que vamos a pulverizar, ya que debe ser alta en el caso de producir polvos puros como cobre, aluminio, titanio, etc. Es decir, de un solo elemento.

Al realizar la atomización de aceros inoxidable, latones, bronce y otras aleaciones, es importante tener en cuenta la composición química de la materia prima. Esto nos permitirá ajustarla dentro del rango deseado en caso de que no podamos adquirirla de manera directa de nuestro proveedor. Además, debemos considerar las características físicas como la densidad y muy crucial el punto de fusión, puesto que nos dará la pauta para elegir el equipo de atomización, si es vertical u horizontal.

- b) El tamaño de partícula y distribución de este es muy importante debido a que esto determina las propiedades mecánicas del polvo resultante y su aplicación final, por lo que nos basaremos en las variables mencionadas en el Capítulo 5.1, las variables principales o las que podemos controlar con mayor facilidad son:

- i. La velocidad con la que alimentamos el metal al crisol de sobre calentamiento.
- ii. La temperatura de sobre calentamiento y de colada.
- iii. El diámetro de la boquilla, ya que podemos intercambiar la boquilla en algunos equipos que permita dicha acción
- iv. La presión del gas, que podemos controlar mediante una bomba.
- v. En ciertos casos, es posible alterar la tensión superficial del metal líquido mediante la adición de elementos como el boro, el titanio o el aluminio a determinadas aleaciones. Estos funcionan de tensoactivos, permitiendo modificar dicha propiedad.

También debemos establecer criterios con respecto a la forma de las partículas, ya que cabe mencionar que la mayor parte de los clientes, solicitan un producto lo más esférico posible, puesto que las características

de esta se asemejan a las de un líquido. Dichos criterios para favorecer esta forma esférica son los siguientes:

- i. Alta temperatura de vaciado
- ii. Los gases que utilizamos para realizar la atomización
- iii. Baja velocidad de jet
- iv. En el caso de los atomizadores de agua, Ángulos de ápice largo.

En el punto i.) es la variable con la que podemos jugar con mayor facilidad, ya que es la que establecemos en el crisol de atomización y solo tenemos que esperar a que la bobina de inducción magnética genere la energía necesaria para elevar la temperatura.

Con respecto al punto ii) los gases inertes con mayor frecuencia usados son: argón, helio y nitrógeno, pero de estos 3 tendremos que seleccionar el que mejor favorezca la forma de esfera. Por lo que nos basaremos en la “conductividad térmica”¹⁸ de dichos gases.

Para el argón es 0,017 W/mK, mientras que para el helio es de 0,151 W/mK y por último el nitrógeno que es de 0,025 W/mK

Elegiremos el gas en función de la importancia de la forma esférica para el cliente. Si no le es relevante dicha característica al solicitante, podremos utilizar con libertad el gas cuyo precio sea menor. Sin embargo, si la forma esférica es de gran importancia debido a sus características requeridas por el cliente en el uso final del producto, elegiremos el argón de entre los 3 gases empleados. Esto se debe a que el elemento tiene la menor conductividad térmica, lo que ayuda a evitar una pérdida excesiva de calor durante la atomización del material fundido. De esta manera, el metal permanecerá en estado líquido el tiempo suficiente para adoptar la forma

¹⁸ Propiedad física que describe la capacidad de un material o sustancia para transferir calor a través de él. Es una medida de la rapidez con la que se transfiere dicha propiedad.

de esfera deseada, en lugar de convertirse con rapidez en elipsoide u hojuela debido a la abrupta pérdida de calor.

En el caso del punto iii.) la baja velocidad del jet significa la rapidez con la que inyectamos el gas y este sale a través de la boquilla del jet. Por lo que podemos controlarlo mediante una bomba que lo impulse. Debemos seleccionar velocidades de flujo bajas ya que a mayores valores lleva más fuerza el gas y deforma con mucha facilidad el metal fundido, produciendo gotas similares a lágrimas con superficie rugosa. Recordemos que nuestro interés es fabricar polvos con forma esférica, regular y con superficie lisa.

Con respecto al punto iv) En el caso de los atomizadores de agua. Ángulos de ápice largo. Se utiliza un modelo matemático que ayuda a determinar el ángulo que debe de tener la boquilla del jet con respecto al chorro de metal, dicho modelo es el siguiente:

$$D = \frac{\beta \ln(P)}{V \sin \alpha}$$

Donde:

D es el tamaño de partícula

β es una constante que incorpora tanto los efectos del atomizador como del material.

P es la presión del agua

V es la velocidad del agua

α es el ángulo que hay entre el chorro de metal fundido y los jets que disparan el agua.

A altas velocidades del agua, se produce una disminución del tamaño medio de la partícula. Por lo que al decir que sea un ángulo de ápice largo nos referiremos a aquel que se encuentra entre el chorro fundido y el aerosol de agua sea pequeño para que el final su forma sea bastante puntiaguda

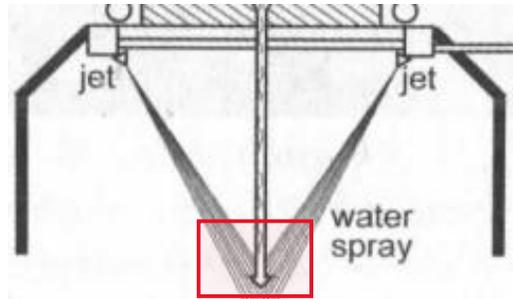


Figura 5. El recuadro rojo ilustra sobre el ángulo de ápice, que debe ser puntiagudo.

En algunos equipos la posición de los jets y por lo tanto su ángulo vienen predefinidos debido a su diseño y no se puede cambiar a nuestras necesidades como fabricantes de polvo metálico.

6.2.2 Criterios para secado.

En los atomizadores de agua, el proceso subsecuente es el de retirar el exceso de humedad presente en el producto. El control en dicha etapa es la temperatura, además del de la permanencia en el secador; por lo que esta será cercana a la de ebullición del agua, mientras que el tiempo será el necesario para evaporar la cantidad de humedad presente. Lo cual se visualiza en la ecuación de Dalton

$$E = \frac{A (P_s - P_v)}{d}$$

Donde:

A es el área de evaporación en m²

P_s es la presión parcial de vapor de saturación a determinada temperatura.

P_v es la presión parcial de vapor en el entorno

d es la distancia de difusión en metros

Para lograrlo, es necesario considerar las presiones parciales de vapor y de saturación, así como del área de la cama formada por el polvo metálico.

Es importante que esta sea uniforme, ya que, si hay variaciones en su espesor, la evaporación del agua no se llevaría a cabo de manera adecuada, lo que dejaría restos de humedad que podrían dañar o corroer nuestro producto.

Se propone realizar una medición del peso final a la salida del atomizador de agua con respecto a la cantidad de polvo producido, debido a esta diferencia del peso será el exceso para evaporar.

6.2.3 Criterios para recocido.

Este proceso, como lo hemos mencionado en el Capítulo 5.4 Atomizadores de agua, es adicional que se lleva a cabo en los polvos de acero o fundiciones que tienen un mayor contenido de carbono, ya que éstos se endurecen debido al temple que sufren al momento de solidificarse, también se aplica a aleaciones de más de 2 elementos.

Para ello nos basamos en un diagrama de fases como el de Hierro-Carbono-Cementita¹⁹, puesto que éste nos indica la temperatura en la que predomina determinada zona y su porcentaje en peso del elemento soluto. Además, cada una de ellas presenta ciertas características como la capacidad de solubilizar el carbono.

Un ejemplo de ello es el hierro α o también llamado “ferrita”²⁰ que es capaz de disolver como máximo un 0,028% en peso de carbono a una temperatura de 727 °C, mientras que el hierro gamma o austenita(γ) puede hacerlo hasta un 2,11% a 1148 °C. Entre este rango observamos las zonas de la [ferrita (α) + austenita (γ)] y la de [(γ) + cementita (β)]. Mientras que, por debajo, ocurre una transformación de γ a (α + β).

¹⁹ Compuesto Inter metálico presente en los aceros, su composición es principalmente de hierro y carbono cuya fórmula es Fe₃C de característica muy dura y frágil, su forma es de láminas alternadas de estos elementos.

²⁰ Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en el cuerpo, donde su soluto es carbono en bajas cantidades, presenta baja resistencia y dureza

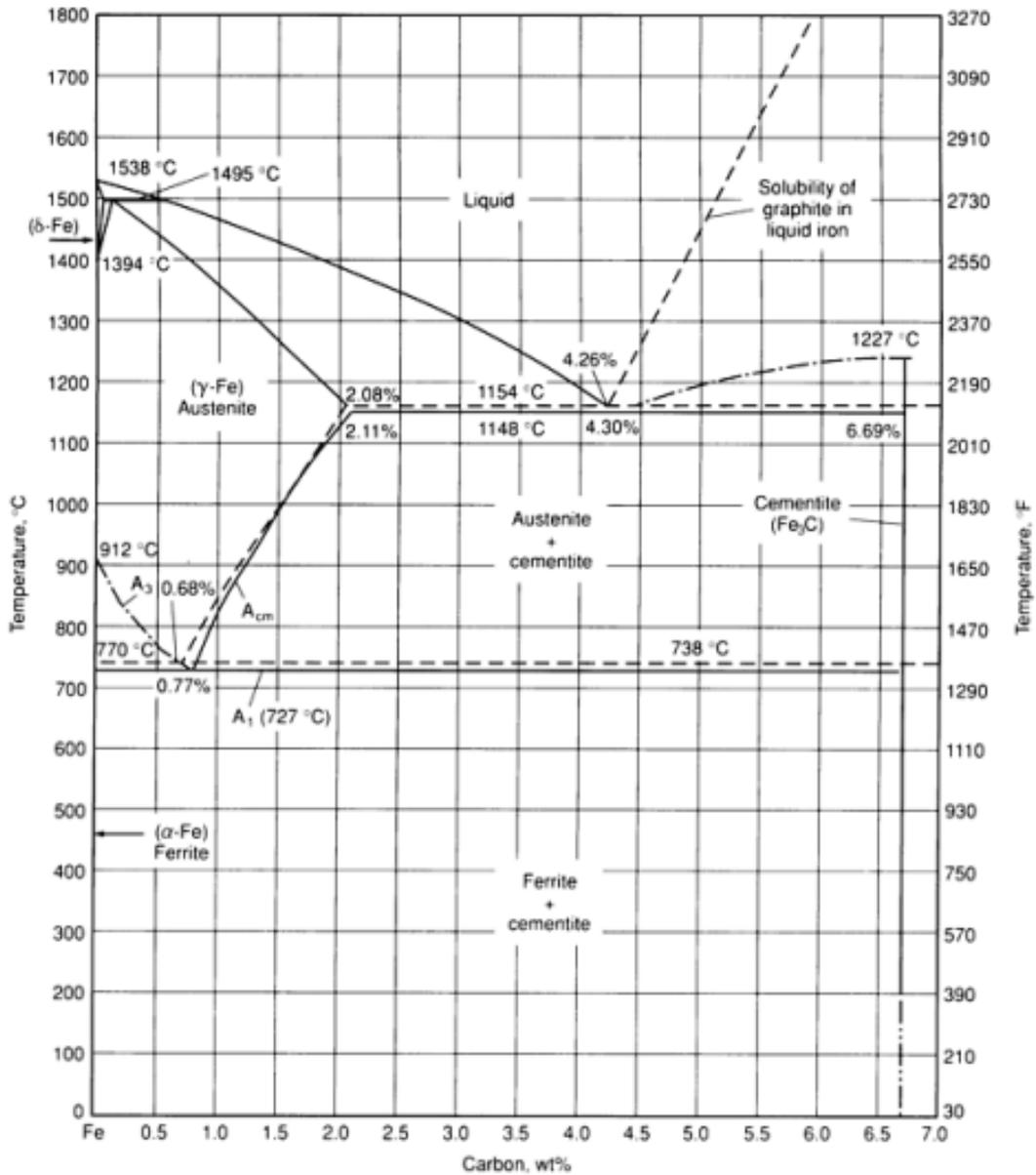


Figura 6. Diagrama de fase Hierro-Carbono-Cementita que ilustra las diferentes fases además de las líneas de tratamiento térmico.

Para garantizar la calidad del producto, es esencial evitar las áreas en la que una de las fases se encuentre en estado líquido o similar a una plastilina. En esta condición, las piezas o nuestro producto se vuelven en extremo maleable, lo que podría provocar deformaciones o incluso aglomeraciones no deseadas. Por lo tanto, es fundamental evitar estas condiciones, y así asegurar un resultado óptimo.

Para ello nos ayudamos de las líneas A_1 , A_3 y A_{cm} donde:

A_1 : es la mínima temperatura para formar la austenita, también llamada "temperatura eutectoide"²¹

A_3 : es el límite de temperatura más baja de la región austenítica en contenidos pequeños de carbono, además de ser la línea de división entre el área de la Ferrita y la de Austenita+Ferrita.

A_{cm} : es el límite que divide las zonas de las fases Austenita (γ) + Ferrita (α) y Austenita (γ) + Cementita (β)

Por otra parte, para realizar con éxito un proceso de tratamiento térmico, se utiliza un diagrama de transformación que puede ser de transformación isotérmica de tiempo o también llamado Tiempo-Temperatura-Transformación (TTT) o un diagrama de enfriamiento continuo (CCT)

El primer método ilustra el proceso de mantener un acero a una temperatura constante durante un periodo prolongado con el propósito de llevar a las fases presentes en el material a la región de austenita donde se puede disolver una mayor cantidad de carbono. Luego, se ejecuta un enfriamiento rápido hasta la temperatura deseada y se mantiene por un tiempo suficiente, permitiendo la transformación de una fase a otra. Por último, se procede a un enfriamiento rápido para asegurar que el material la retenga.

En el caso del recocido se lleva a temperatura donde la austenita sea estable, calentando más allá de la línea A_1 y de A_{cm} , dando tiempo de que el carbono de la martensita se disuelva y difunda en γ , ya que el principal motor del cambio de fase es la difusión.

Nos apoyaremos de un diagrama de enfriamiento continuo, con él se predice la microestructura que tendrá el material en función de la velocidad de enfriamiento.

²¹ El eutectoide significa similar a la eutéctica, es la temperatura a la cual se lleva a cabo la transformación de descomposición la fase austenita en las fases de ferrita y cementita normalmente simbolizadas como α y β .

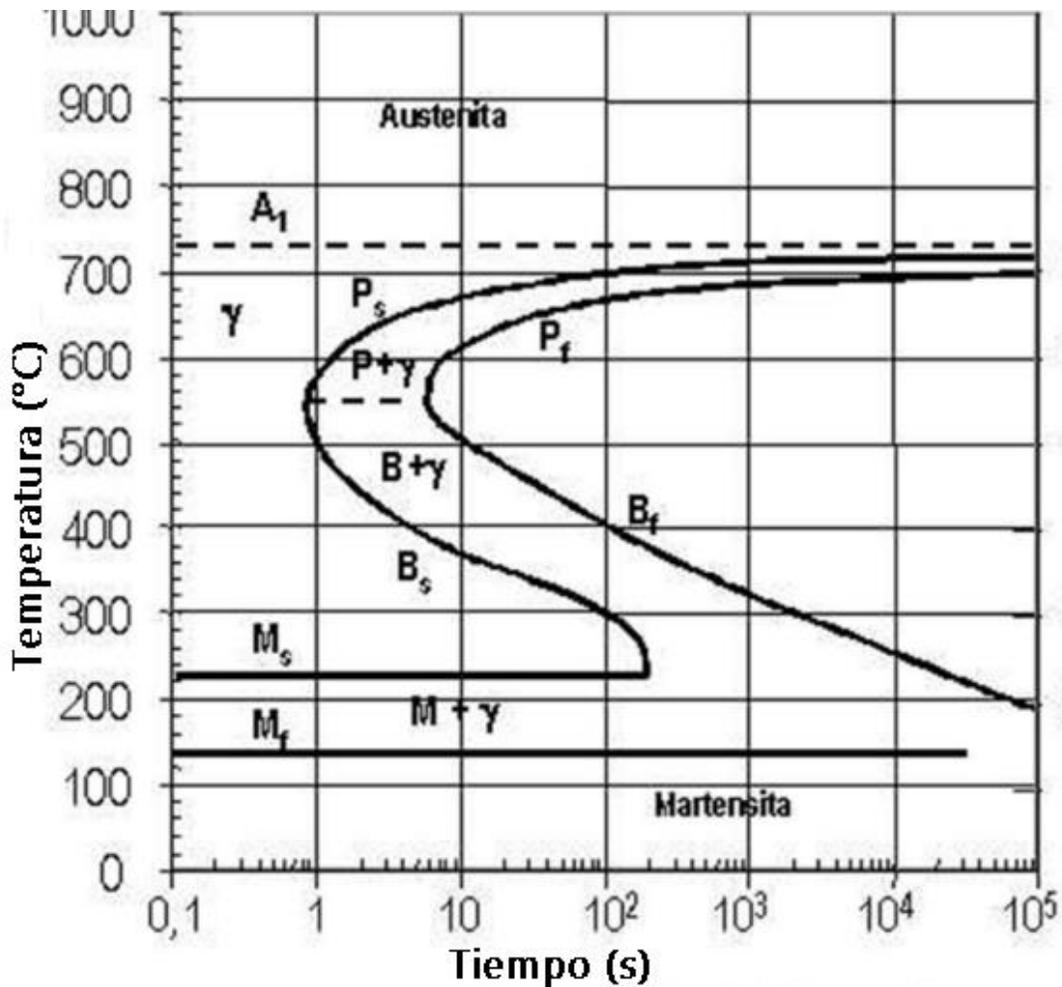


Figura 7. Diagrama de transformación en enfriamiento continuo (CCT) para un acero AISI 1045

Al observar la figura 7, podemos identificar las Áreas de predominancia de las fases, las líneas de inicio y de final de la transformación; el nombre y la distribución de las zonas son propias de cada aleación o material. En este caso se observa un diagrama de enfriamiento continuo para un acero AISI 1045 cuyos nombres son los siguientes:

γ: Austenita.

P_s: inicio de la transformación de austenita a Perlita.

P_f: final de la transformación de austenita a Perlita

B_s: inicio de la transformación de austenita a Bainita.

B_f: final de la transformación de austenita a Bainita.

M_s: inicio de la transformación de austenita a Martensita.

M_f: final de la transformación de austenita a Martensita.

Por último, debemos seleccionar el medio de enfriamiento, según lo necesitemos, ya sea baño de sales fundidas, algún tipo de aceite o agua. Ya que este nos ayudará extraer el calor de la pieza de manera rápida o lenta, según sus propiedades térmicas.

Con base en toda esta información, es posible planificar y llevar a cabo de manera exitosa el recocido. El objetivo principal de este tratamiento es disminuir la dureza y fragilidad de los polvos de acero que han presentado un endurecimiento en su microestructura durante el proceso de atomización.

Es importante destacar que este tratamiento térmico no se limita a las aleaciones ferrosas, sino que también se aplican a no ferrosas. Es decir, puede utilizarse en mezclas cuyo componente principal difiere del hierro.

En este caso, el propósito es homogeneizar la microestructura para obtener una más uniforme. Durante el proceso de enfriamiento y solidificación, se generan formas ramificadas conocidas como “dendritas”²², las cuales tienen una apariencia similar a la de los helechos. Estas se componen de gran parte por el metal con el punto de fusión más alto, ya que se solidifica primero. Entre ellas, hay regiones el elemento con el punto de fusión más bajo. Debido a estas diferencias, el material exhibe propiedades mecánicas distintas en cada región, lo que se conoce como “anisotropía”²³ en su desempeño.

²² Estructura con ramificaciones repetitivas que se observa a menudo en los procesos de crecimiento de los cristales, en especial en aleaciones que contienen múltiples fases. Esto sucede cuando el material se enfría con rapidez. Si el enfriamiento es demasiado rápido, las ramificaciones resultantes tendrán un tamaño muy pequeño.

²³ Que posee propiedades que varían en función de la dirección en el espacio

Para eliminarla, se realiza un proceso llamado homogeneización química por recocido. Durante este, se eleva la temperatura del material a un nivel adecuado y se mantiene por un tiempo suficiente. Esto permite la difusión de los elementos entre las dendritas y las regiones circundantes, logrando así la homogeneización. Al hacerlo, se busca igualar la composición en todo el material, eliminando las diferencias y obteniendo una microestructura más uniforme.

6.2.4 Criterios para Limpieza (molienda).

Si bien el proceso de molienda sirve para reducir el tamaño de partícula por el impacto y fractura del material. En esta etapa se necesita limpiar el polvo de los posibles óxidos formados en la solidificación, por lo que introduciremos el producto en un molino de bolas, el principal control que debemos tener es la velocidad de rotación o de trabajo) y la carga de bolas.

Es importante determinar dicho parámetro a la cual debe girar el molino logrando su cometido. Cuando la velocidad es extrema, los “implementos de molienda”²⁴ y el material tienden a adherirse a la pared interna del molino debido al efecto centrifugo. Por lo tanto, es crucial encontrar la velocidad justa que permita que los implementos se muevan de manera adecuada y lleguen a una posición específica. Cuando caigan, deben romper la superficie de óxidos sin deformar demasiado el producto o causar que se aglutine.

A este parámetro se le conoce como velocidad de trabajo (V_T). Esta varía, dependiendo del tipo de molino y los requisitos de molienda, entre el 70 y 80 % de la velocidad crítica (V_C), La V_C es aquella en la cual una bola en el interior del molino se adhiere a la pared debido al efecto centrifugo y luego se desprende al alcanzar la parte superior del mismo cayendo libremente.

²⁴ Son herramientas en el proceso de molienda para reducir el tamaño de las partículas de los materiales, pueden ser bolas de acero o cerámicos de distintos tamaños, o bien rodillos de estos mismos materiales.

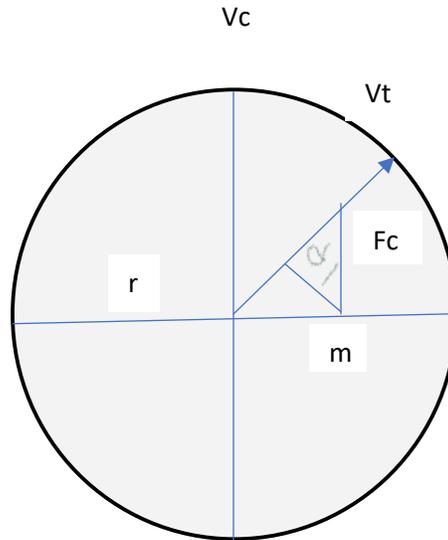


Figura 8. Esquema de fuerzas en un molino.

Donde:

F_C : es la fuerza centrífuga = $\frac{m v^2}{gr}$

F_T : es la fuerza trabajo = $F_C - m \cdot \text{sen}(\alpha)$

Si $F_T = 0$ y el Angulo 90°

$\frac{mv^2}{gr} = m$; cancelando m y reacomodando.

$$V^2 = gr$$

Velocidad periférica.

Es la velocidad de la zona exterior de un elemento sometido a rotación, en nuestro caso son los implementos de molienda. Su expresión es la siguiente: $V = n\pi d$

Donde **n** es el número de revoluciones por segundo y **d** es el diámetro.

Si sustituimos la ecuación anterior en la velocidad periférica obtenemos lo siguiente.

$$g \cdot r = n^2 \pi^2 d^2; \text{ siendo } r = \frac{d}{2}; \text{ por lo tanto, } d^2 = 4r^2$$

sustituyendo en la misma ecuación.

$$g \cdot r = n^2 \pi^2 (4r^2)$$

despejando n que es el número de revoluciones por segundo.

$$n = \sqrt{\frac{g}{4\pi^2} \frac{1}{\sqrt{r}}}, \text{ sabiendo que } g \text{ es la aceleración de la gravedad}$$

Para lograr el valor de velocidad crítica en revoluciones por minuto que debemos ingresar en el equipo necesitamos el radio de molino y multiplicar el resultante por 60, ya que son los segundos que contiene dicha unidad. Por lo que queda la siguiente expresión.

$$V_c = \frac{29.91}{\sqrt{r}}$$

Una vez determinada la velocidad crítica podemos calcular la velocidad de trabajo, la cual se halla a 135° con respecto a la horizontal, por lo que.

$$V_T = \frac{135}{180} = 0.75$$

$$V_T = 0.75 V_c$$

Por lo que se dice que la velocidad de trabajo es el 75 por ciento de la velocidad crítica.

Como mencionamos al principio del apartado de limpieza, además de la velocidad de trabajo se requiere determinar un control adicional, el cual se denomina carga de bolas, "éste debe ser un factor constante, ocupando un volumen proporcional a ellos, es decir como una carga apropiada, la que ocupe el volumen correspondiente a un tercio del diámetro de trabajo del molino" (Faustino, J.S. 2010, *Apuntes para el laboratorio beneficio de minerales*, p 62 [impreso])

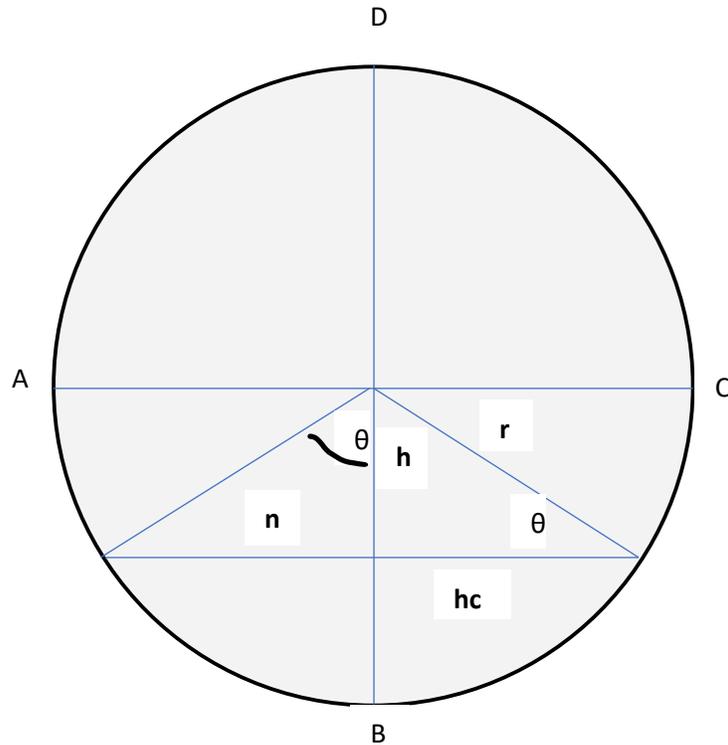


Figura 9. Esquema para determinar el volumen de la carga de bolas.

$$\text{Si } hc = \frac{D}{3} \text{ y } h = \frac{D}{6}$$

El área inferior del círculo denotada por los puntos ABC

$\text{Cos } \theta = \frac{h}{r} = \frac{\frac{D}{6}}{\frac{D}{2}} = 0.333$; por lo que al aplicar la función inversa encontramos el ángulo θ .

$\Theta = 70.52^\circ$ o $70^\circ 31'$ si se transforma el .52 a minutos de arco.

Debido a que hay dos triángulos rectángulos, este valor se multiplica por 2 para considerar el mismo ángulo del otro triángulo.

$$2 \Theta = 141.04^\circ \text{ o } 141^\circ 2'$$

Ahora procedemos a calcular el ángulo superior del triángulo, por lo que nos apoyaremos de la tangente.

$$\tan \Theta = \frac{n}{h}; n = h \tan \Theta$$

necesitamos relacionar el diámetro en nuestra ecuación por lo que lo sustituimos de la siguiente manera:

$$\text{área DAC} = hn = h^2 \tan \Theta$$

sabiendo que el área de un círculo es $A = \pi r^2$; sustituyendo el radio por el diámetro entre 2

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4}; \text{ simplificando: } A_c = D^2 \cdot 0.7854$$

$$\text{Calculando el área DABC0} = \frac{D^2 \cdot 0.7854}{360} 2\theta$$

Por lo que le área ABCA es la resta de DABC0 – DAC

$$ABCA = \frac{D^2 \cdot 0.7854}{360} 2\theta - h^2 \tan \theta$$

Basándonos en el círculo unitario para dar valores a la ecuación anterior y al sustituir quedaría de la siguiente manera.

$$D = 2; r = 1; h = \frac{D}{6}$$

$$\text{Área ABCA} = \frac{(4) \cdot 0.7854}{360} (141.02) - (0.1111) (2.8270) = 0.9166$$

Si el área del Círculo unitario es: 3.1416

$$\% \text{del volumen} = \frac{0.9166}{3.1416} \times 100 = 29.18\%$$

“Para determinar la carga de bolas, el volumen determinado deberá ser afectado por el volumen de huecos, el cual corresponde a 30% del mismo, y por el producto del volumen resultante multiplicado por el peso específico de los miembros de trabajo, proporciona el peso total de la carga de bolas”. (Faustino, J.S. 2010, *Apuntes para el laboratorio de beneficio de minerales*, p. 64[Impreso]). UNAM.

La carga de boas o CB

$$CB = \frac{(29.18)(0.7)\rho V}{100}; \text{ simplificando } CB = (0.20426) \rho V$$

Donde ρ (rho) es la densidad de los implementos de molienda, recordando que se hizo mención de 2 tipos de implementos, unos están hechos de hierro mientras que los otros están fabricados de cerámicos.

$$P_{\text{hierro}} = 7874 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ y } P_{\text{guijarros cerámicos}} = 2720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Por último, V es el volumen del molino en metros cúbicos.

Los valores anteriormente descritos y calculados desempeñarán un papel crucial como control en nuestro proceso de limpieza a través de la molienda, las bolas alcanzarán la velocidad y altura óptimas para caer por efecto de la gravedad chocando así nuestro material y fracturando la capa de óxido formada sin deformar ni aglomerar el polvo debido al impacto generado por las bolas.

6.2.5 Criterios para Tamizado.

Es un método de separación de partículas en donde se hace pasar por un tamiz o redes de mallas para seleccionar partículas sólidas según su tamaño, dejando traspasar a las partículas lo suficientemente pequeñas por los orificios de las mallas y reteniendo las más grandes.

La técnica de tamices se puede emplear por ser barata, aunque existan algunas complicaciones para cuantificar el tamaño del polvo por debajo de la malla #400 (38 micras), la medida promedio de las partículas ronda las 100 y 150 micras.

En este caso, el único control que se puede proponer es que las partículas más grandes o gruesas que se quedan retenidas en las mallas se reciclen en el proceso de atomización.

6.2.6 Criterios para Mezclado.

En esta etapa procedemos a combinar nuestro producto con lubricantes sólidos o con algún otro polvo, ya sea cerámico o metálico por indicaciones del cliente. Si este no lo necesita, el proceso se omite.

El control principal que precisamos en esta etapa es la velocidad de trabajo tal como en un molino de bolas, la diferencia es que en este mezclador no se le añaden implementos de molienda, solo el polvo metálico para mezclar.

6.2.7 Criterios para pruebas de caracterización.

Así como establecimos criterios para los procesos, también es importante tenerlos claros para aceptar nuestros productos y servicios. Esto se menciona el apartado 2 del inciso b) de la sub-cláusula 8.1 Planificación y control operacional. El proceso de pruebas para verificar el cumplimiento de las características del producto solicitado por el cliente se debe realizar en cada lote o pedido proveniente del tamizado.

6.2.7.1 Muestreo de polvo por ASTM B215-15

La primera prueba que realizaremos es la de muestreo de una pequeña cantidad de polvo la cual debe ser lo más representativa posible de todo el material de partida, por lo que nos apoyamos de la Norma *ASTM B215-15 “prácticas estándar para muestreo de polvos metálicos”* la cual nos indica 2 formas de recolección de la muestra, la primera práctica es aplicable a dicha acción de polvos en movimiento, por ejemplo cuando se transfieren de un contenedor a otro o a un flujo de proceso; o al caer de una banda transportadora de proceso en movimiento, por lo que lo podemos obtener saliendo del tamizado o del mezclado al vaciarse al contenedor que lo lleva hacia la máquina de empacado.

En ella la toma de incrementos debe ser acordada por ambas partes interesadas, los cuales deben ser iguales a intervalos aleatorios cuando el polvo esté en movimiento (si es que se prefiere la primera forma de muestreo) pasando un contenedor por el flujo de polvo al momento de ser transferido de un lugar a otro al principio del flujo y al final de éste, al finalizar hay que combinar los incrementos tomados para formar la “muestra bruta”²⁵ y mezclarla bien

²⁵ Cantidad de polvo adecuada para los fines previstos, que consta de todos los incrementos combinados.

La segunda práctica es aplicable al muestreo de polvos que ya se han empacado para transporte, como en una bolsa o que estén en un contenedor estático. Un muestreador de ranura tubular hueca es la forma recomendada de muestrear estos polvos envasados para obtener los “incrementos”²⁶.

Al recolectar especímenes del producto a diferentes profundidades, se utiliza un muestreador de ranura o de tubo, similar al mostrado en la **Figura 10**. Se clava en la superficie y se gira como un sacacorchos hasta alcanzar la profundidad deseada. Luego, se toman incrementos en diferentes partes y de cada profundidad, siguiendo las indicaciones del apartado 7.1.1.5 y 7.1.1.6 de la norma ASTM B215-15.

Al igual que la practica anterior, la cantidad de incrementos y número de contenedores o paquetes deben ser acordados entre las partes interesadas.

Por otro lado, se puede emplear una cuchara especialmente diseñada para tomar muestras de polvos metálicos, cuyas especificaciones están en la norma ASTM B215-15. Raspando de manera lateral 2 pulgadas de la parte superior de la región central, dejando al descubierto un área de aproximadamente 10 x 10 pulgadas de polvo fresco. Siguiendo el procedimiento del punto 7.1.2.3 al 7.1.2.6 de la norma de muestreo.

Debemos mezclar los incrementos en una licuadora pequeña a una velocidad de 10 a 15 rpm para formar la muestra compuesta.

²⁶ Cantidad de polvo obtenido mediante un dispositivo de muestreo que proviene de una cantidad más grande de polvo.



Figura 10. Muestreador de ranura de 2 niveles con punta de barrena. ASTM international (2015) [imagen], “Standard Practices for Sampling Metal Powders” (p.3).

La norma nos proporciona una tabla que sugiere el número de contenedores a muestrear según el lote producido.

Tabla 1. Cuadro de muestreo, para determinar el número mínimo de contenedores recomendada seleccionados al azar de cada lote de polvo

No. De contenedores por lote	Número de contenedores a ser muestreados (aleatoriamente)
1 a 5	Todos
6 a 11	5
12 a 20	6
21 a 35	7
36 a 60	8
61 a 99	9
100 a 149	10
150 a 199	11
200 a 299	12
300 a 399	13
Más de 400	13 +1 por cada 100 contenedores adicionales.

Nota. Recuperado de ASTM International, designation: B215-15. *Standard practices for sampling metal powders*[traducción]. (p.5).

Esta práctica no se recomienda si se va a muestrear polvos de alta reactividad, ya que estos se oxidan al contacto con el oxígeno o la humedad del ambiente, por lo que para este tipo se recomienda realizar el muestreo a la salida del colector o torre de enfriamiento de los atomizadores.

Una vez conseguida la muestra compuesta se procede a obtener de esta las porciones de ensayo para las pruebas correspondientes. Para ello nos apoyamos de dos aparatos llamados divisor de tolvas o chute splitter y el otro riffler giratorio.

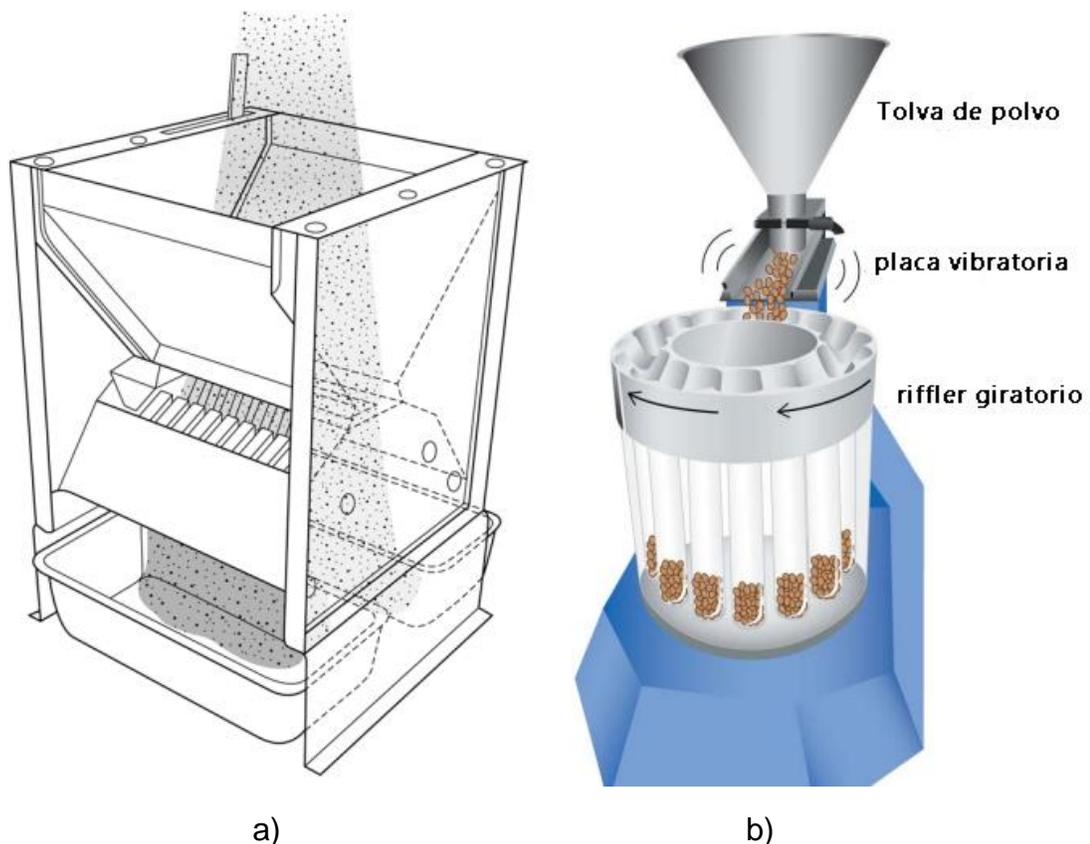


Figura 11. Aparatos o dispositivos para la obtención de porciones de prueba, a la izquierda tenemos en el inciso a) Divisor de tolva y a la derecha b) riffler giratorio.

ASTM international (2015) [esquemas], "Standard Practices for Sampling Metal Powders" (p.p 4 y 5).

Se usa el primer dispositivo que divide la muestra compuesta en porciones más pequeñas, hasta que cada división sea lo suficientemente pequeña para usar un riffler giratorio o alcance la porción de prueba de tamaño.

Vertimos con suavidad a una velocidad en que fluya libremente toda la cantidad de muestra compuesta en la bandeja superior de carga del divisor para que se distribuya con uniformidad de un lado a otro a través de los conductos y hacia los recipientes de recolección. Debemos seguir las indicaciones 8.2.1 a la 8.2.4 para obtener la muestra deseada.

Después de completar la etapa anterior, continuamos utilizando el riffler giratorio. Vertimos la cantidad total de la muestra, ya sea la muestra compuesta completa o una de las divisiones del divisor del paso anterior, en la tolva de polvo. Mantenemos una tasa de alimentación y una velocidad de rotación constantes para asegurar que toda la muestra compuesta pase en no menos de 100 rotaciones.

Después de que se haya realizado la distribución inicial, medimos el tamaño de la muestra determinando la masa (o el volumen) del polvo de uno de los recipientes colectores riffler.

Por último, se pueden hacer los siguientes ajustes necesarios:

- a) usando una de las muestras provenientes del equipo riffler giratorio.
- b) Combinando dos o más de las muestras provenientes del riffler giratorio.
- c) Empleando una o más de las muestras hechas con anterioridad en el equipo con el fin de aumentar la cantidad en los contenedores restantes previamente llenados; repetimos el paso del uso del riffler para producir muestras de menor tamaño hasta alcanzar el tamaño de porción de prueba deseado. Si cada muestra hecha por este método se vuelve demasiado

pequeña para utilizarse como porción de ensayo, se pueden combinar dos o más de estas formando la cantidad necesaria.

Hasta este punto tendremos listas las muestras para realizar los ensayos de calidad subsecuentes, tal es el caso de la prueba de distribución de tamaño de partícula, el cual nos indicará el porcentaje del polvo se encuentra en cierto tamaño de partícula.

Este es una de las características más importantes de los polvos metálicos para ser cuantificada, esta determinación depende de la técnica de medición y puede ser lograda por varias técnicas.

7. Establecimiento de criterios en pruebas de calidad para la liberación del producto con respecto a la cláusula 8.6 “liberación de los productos y servicios” de la norma ISO 9001:2015

7.1 Distribución de tamaño de partícula ASTM B214-22

La mayoría de los instrumentos para medir el tamaño de partícula lo hacen en un parámetro geométrico único y realizan la suposición de una partícula esférica. Estas técnicas pueden ser microscopía, tamizado, sedimentación, dispersión y difracción de la luz, entre otras.

Por ejemplo, la microscopía se usa con frecuencia para medir el tamaño de partículas. En este método, se captura una imagen de ellas que luego se digitaliza. Después, se superponen círculos de diferentes tamaños en las imágenes de las partículas, y se cuenta el número de estas en cada tamaño mediante un programa automatizado. Dicha tarea se lleva a cabo a través de un microscopio de barrido o de transmisión electrónica conectado a una computadora.

Esta técnica se aplica comúnmente a partículas que van desde unos pocos nanómetros hasta milímetros, lo que significa que su rango es amplio. Sus ventajas incluyen mostrar la topología de la superficie y análisis de composición

mediante rayos-X, además de poder generar una frecuencia de distribución que muestra la frecuencia relativa de cada tamaño. No obstante, para lograrlo, es crucial dispersarlas, ya que tienen la tendencia a agruparse, lo que dificulta diferenciar entre partículas individuales. Esta aglomeración es un problema común, puesto que puede llevar a interpretan erróneamente que las partículas son más grandes de lo que en realidad son.

Otra de las técnicas de las que nos podemos apoyar en la cuantificación de la distribución de tamaño es el método de tamizado, debido a que es el más satisfactorio para reportar y graficar dicha característica mediante series geometrías de tamices. El punto de referencia en su escala es 75 micrómetros, la cual es la apertura de malla #200 hecha de alambre tejido, además de estar estandarizado por el buró nacional de estándares a través del estándar Tyler o de las series de tamices normalizados de los estados unidos, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Series estándar de tamices de prueba y su equivalente en tamices de serie estándar “Tyler”.

Designación de número de malla	Apertura del tamiz, μm		
	Serie nueva de U. S	Serie vieja de U. S	Serie de Tyler.
20	850	841	833
35	---	---	417
40	425	420	---
60	250	250	295
80	180	177	175
100	150	149	147
140	106	105	---
150	---	---	104
200	75	74	74
230	63	63	---
250	---	---	63
325	45	44	44

Nota. Recuperado de Upadhyaya, A., & Upadhyaya, G. S. (2010). *Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials* [tabla] (p.84). Baldev Raj.

La nueva designación fue adoptada en 1970, solo si no se cuenta con ella se puede usar aún la serie de tamices estándar de Tyler. Se requiere una maquina tipo Ro-Tap que es un agitador común de tamices, la cantidad de muestra para tamices convencionales es de 50 g. para que el análisis sea preciso. Si el polvo es de algún metal precioso, existen tamices más pequeños para reducir el tamaño de la muestra necesaria.

Al realizar este ensayo nos guiamos de la norma ASTM B214-22 “Método de prueba estándar para el análisis de tamiz de polvos metálicos” utilizando los incrementos o bien la muestra compuesta del paso anterior, recordando que deben ser 50 g. como mínimo para que los resultados sean precisos.

Esta prueba es ampliamente empleada, ya que es sencilla de reproducir, además de ser relativamente barata, puesto que solo necesitamos un kit de tamices y un agitador de tamices tipo Ro-Tap.

Según el apartado 6 de la norma ASTM B214-22, el tamaño de la muestra debe estar entre 90 y 110 g. para cualquier polvo metálico cuya densidad aparente es mayor o igual a 1.5 g/cm^3 , de acuerdo con los métodos de prueba B212, B329, B417 o B703. Si dicha densidad es menor, entonces se usará una porción de 40 a 60 g. de muestra compuesta. Comenzamos asegurándonos que los tamices estén limpios y sin obstrucciones, la selección de estos se realiza basándonos en el tamaño medio de las partículas, que por lo general se encuentra entre 100 y 150 μm para este proceso de atomización. Por lo tanto, seleccionamos dos tamices por encima del límite máximo, donde se retendrían partículas aglomeradas en caso de haberlas, mientras que, en los inferiores pasarían partículas cada vez más pequeñas.

Los tamices se acomodan en orden descendiente de tamaño, colocando el tamiz de malla más grande o tosca en la parte superior y la más fina en la inferior junto con un colector sólido llamado “pan” en inglés o cacerola, en esta se recolectará las partículas finas cuyo tamaño es inferior a 45 μm . Después se pone la muestra compuesta en el tamiz superior y se cierra con una cubierta sólida para rápidamente colocar los tamices en el agitador por un periodo de 15 min.

Una vez finalizado el proceso, se retiran los tamices con los polvos retenidos y se vierten en un papel encerado o esmaltado. Se golpean con suavidad los bordes de las cribas y se cepilla el interior para eliminar cualquier material adherido a ellos, asegurándonos que el material se haya retirado por completo. Realizar esto para cada tamiz utilizado.

Después se pesan individualmente cada fracción retenida por los tamices, incluyendo la del “pan”; la suma de los pesos de dichas fracciones no debe ser menos del 99% de la muestra compuesta ingresada.

El reporte de resultados sigue el ejemplo proporcionado en la página 2 de la norma ASTM B214-22. En el expresamos las masas de las fracciones retenidas en cada tamiz y la fracción recolectada en el pan como porcentajes. Cualquier fracción menor a 0.1% se reporta como “traza”, y si una fracción está ausente, se hace como “0.0”. También se incluye el tiempo en el que se realizó el tamizado en el equipo.

Tabla 3. Formato para reportar los datos de prueba de un polvo típico de malla 100.

Series estándar de los estados unidos.		
Tamaño de partícula (µm).	Numero de tamiz o malla.	% Masa retenida.
>180	+ 80	-----
≤ 180 < 150	- 80 + 100	-----
≤ 150 < 106	- 100 + 140	-----
≤ 106 < 75	- 140 + 200	-----
≤ 75 < 45	- 200 + 325	-----
≤ 45	- 325	-----

Nota: Adaptación de la tabla original de la norma ASTM B214-22 “métodos de prueba estándar para el análisis de tamizado de polvos metálicos”

7.2 Densidad aparente por ASTM B212-13

Al principio de la prueba de tamizado se mencionan las características con las que debe de contar el polvo para poder realizar dicho ensayo. Por lo que nos aseguramos de que se cumplan las condiciones necesarias, es crucial ejecutar un examen previo verificando si se cuentan con ellas, como la densidad aparente. Este análisis se lleva a cabo según la norma ASTM B212-13 “Método de prueba estándar para la densidad aparente de polvos metálicos de flujo libre usando en embudo de caudalímetro hall”. En este, un volumen del material fluye hacia un recipiente de volumen definido conocido como “copa de densidad”²⁷ bajo condiciones controladas. La masa de polvo por unidad de volumen se determina y se informa como densidad aparente.

En esta ocasión en vez de basarnos en el peso de la muestra compuesta obtenida con anterioridad por medio de la norma ASTM B215-15, necesitaremos un volumen aproximado de polvo metálico de 30 a 40 cm³.

Después de pesar la copa de densidad, procedemos a colocar la muestra en el embudo del medidor de flujo sin moverlo, hasta que el polvo llene con totalidad la copa y comience a rebosar por la periferia. Luego, giramos el embudo 90° para que el restante caiga fuera de esta. Con una espátula no magnética colocada de manera perpendicular al borde superior de la copa, nivelamos el polvo al ras. Después, golpeamos con suavidad el costado de esta para asentar el material y evitar derrames durante la transferencia hacia la balanza, donde determinamos la masa del polvo. Por último, en esta prueba se realizan los cálculos necesarios para obtener la densidad aparente de la siguiente manera.

$$AD_H = \frac{M}{V}$$

donde:

M: es la masa del polvo en la copa de densidad en g.

²⁷ Copa cilíndrica de latón que tiene una capacidad nominal de 25 cm³.

V: es el volumen de la copa de densidad en cm^3

AD_H : es la densidad aparente por el método de Hall, en g/cm^3 .

Se reportan los resultados como densidad aparente hall cercanos a $0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$

7.3 Velocidad de flujo por ASTM B213-13

Continuando con las pruebas que se le realizan los polvos metálicos es el de velocidad de flujo mediante la norma ASTM B213-13 "Método de prueba estándar para velocidad de flujo de polvos metálicos usando el embudo medidor de flujo Hall".

Tomando una porción de 50 g de la muestra compuesta proveniente del método de muestreo ASTM B215 -15, la norma cuenta con 2 métodos para su medición. El primero método de flujo estacionario, se pesan 50g de muestra y bloquear el orificio inferior del embudo para verter el polvo en el centro del embudo, debemos colocar un vidrio de reloj o nave de pesado para recolectar el polvo. Al quitar el dedo del orificio para que el polvo caiga activamos el cronómetro, si el polvo aún no se mueve, se permite solo un único golpe al embudo para promover el movimiento del polvo, se detiene el cronometro en el instante que la última parte del polvo salga del orificio. Registrando el lapso a 2 cifras significativas. Se debe realizar por triplicado y reportando el tiempo promedio.

El segundo es el método de flujo dinámico. La diferencia es que no se obstruye inicialmente el orificio inferior del embudo, se coloca el polvo en el embudo y se inicia el cronometro cuando el polvo comience a salir del orificio y se detiene cuando la última parte de este salga del orificio. Registrando y reportando de la misma manera que en el método anterior.

El cálculo se realiza como se indica en el punto 11 de la norma que estamos utilizando. Para reportar se hace como $FR_H = t \text{ (s)} / 50 \text{ g}$

7.4 prueba de compresibilidad por ASTM B331-16

Una prueba importante para los polvos metálicos es la de compresibilidad, que evalúa cuánto se pueden comprimir al aplicarles una presión externa. Los resultados se expresan como densidad en g/cm^3 , junto con la presión de compactación utilizada.

Esta propiedad es influenciada por la forma de la partícula, la distribución de tamaño de partícula, la dureza propia del metal o aleación, porosidad interna y los aditivos o lubricantes que el cliente requiera para sus propósitos. El método de ensayo es útil en proyectos de investigación y desarrollo, como prueba de calidad en la evaluación y control de fabricación de la producción de polvo metálico, y como aceptación en el envío de lotes del producto.

Además, es útil para determinar los requisitos de prensado y herramientas para piezas de alta densidad fabricadas por el cliente.

La norma ASTM B331-16 “método de prueba estándar para compresibilidad de polvos metálicos en compactación uniaxial” indica que puede ser para polvos lubricados y no lubricados, cuando se reciba un polvo que ya esté mezclado con un lubricante como aditivo se debe usar tal como se solicitó, mientras que para los que no lo están se debe recubrir con un lubricante en polvo las paredes del interior del dado antes de cada prueba

El método de prueba indica 3 maneras de realizarse:

- 1) compresibilidad definida como densidad verde obtenida a la presión de compactación seleccionada
- 2) compresibilidad a través de un gráfico que relaciona la densidad en función de al menos 4 presiones de compactación
- 3) compresibilidad definida como la presión de compactación requerida para alcanzar como objetivo la densidad en verde.

También, a fin de ejecutar la prueba, se requieren dos dados o matrices de compactación: uno rectangular y otro cilíndrico. Las características de estos están especificadas en el punto 9.2 de esta norma bajo el título "especímenes de prueba para la compresibilidad de polvos".

La muestra compuesta a utilizarse debe provenir del método de muestreo ASTM B215-15 "Prácticas para el muestreo de polvos metálicos" y la porción de prueba para la compresibilidad viene indicada en el punto 9.3.2 y 9.3.3

A fin de calcular la presión de compactación utilizando la carga aplicada, es necesario compactar y etiquetar tres especímenes de prueba de compresibilidad por duplicado. Una vez lleguemos a la presión máxima, deberemos quitar la carga empleada para realizar dicho cálculo.

Determinamos la masa de cada espécimen de prueba a 2 cifras significativas y sus dimensiones de cada espécimen con una precisión de 0,0002 pulgadas. (0,005 mm).

El cálculo de la densidad en verde de los especímenes se realiza de la siguiente manera:

Para especímenes de prueba cilíndricos.

$$D_G = \frac{0.0777 \times M}{(D^2 \times T)}$$

Donde:

0.0777: factor de conversión combinado, pulg.³ a cm³ y π para el cálculo del área.

M: masa en gramos del espécimen de prueba de la compresibilidad verde.

D²: diámetro al cuadrado del compactado en pulgadas cuadradas.

T: espesor del compactado en pulgadas.

Para especímenes de prueba rectangulares.

$$D_G = \frac{0.0610 \times M}{(L \times W \times T)}$$

Donde:

0.0610: factor de conversión, pulg.3 a cm3.

L: longitud del compactado.

W: ancho del compactado en pulgadas.

M: masa en gramos del espécimen de prueba de la compresibilidad verde.

T: espesor del compactado en pulgadas.

Para reportar esta prueba consta de igual manera de 3 métodos los cuales están descritos en el punto 11 de la norma ASTM B331-16.

Continuando con el inciso c) determinación de los recursos necesarios para lograr la conformidad con los requisitos de los productos y servicios. Dichos recursos son los equipos y aparatos medidores contenidos en las normas que vamos a implementar además del empaquetado del producto.

En la norma ASTM B215-15 los aparatos con los que debemos contar son:

charola rectangular, licuadora pequeña, Muestreador de polvo, pala para polvo, chute splitter, riffler giratorio y charola de carga.

Para la ASTM B214-22 debemos contar con una serie estándar de tamices, agitador de tamices tipo RO-Tap. Y una balanza con resolución de 0.01g y de capacidad 150 g.

Para asegurar que el producto cumpla con los requisitos de densidad aparente, se requieren los siguientes recursos y equipos:

1. Embudo fluxómetro Hall según la norma ASTM B212-13.
2. Copa de densidad.
3. Soporte para el embudo fluxómetro Hall.

4. Mesa de trabajo antivibración.
5. Espátula recta no magnética.
6. Balanza con una resolución de 0.001 g y capacidad mínima de 200 g.

Con estos elementos, podremos medir y garantizar la densidad aparente del producto de acuerdo con los estándares establecidos.

Los recursos o aparatos necesarios para lograr la conformidad del producto en la norma ASTM B213-13 son: embudo flujómetro de polvo, soporte del embudo, mesa de trabajo libre de vibraciones, cronómetro, esmeril chino y balanza con resolución 0.01 g con capacidad de al menos 50 g.

Para cumplir con la norma ASTM B331-16, necesitamos contar con equipos importantes, como matrices de compactación de forma rectangular y cilíndrica, punzones y una prensa hidráulica capaz de aplicar una carga precisa a una velocidad aproximada de 30 TSI/min (400 MPa/min). También requerimos lubricantes en polvo, una balanza de laboratorio que pueda pesar con una resolución de 0.001 g y al menos 100 g de capacidad. Por último, necesitamos un micrómetro u otro instrumento de medición para conocer las dimensiones exactas de los especímenes compactados, con una precisión de 0.0002 pulgadas.

7.5 liberación de los productos y servicios.

En cada una de las etapas del proceso se deben realizar actividades de seguimiento y medición por el personal designado a dicha área por medio de bitácoras u hojas de seguimiento (el formato puede variar) en donde se recopilen las variables descritas antes.

Para prevenir errores humanos se deben verificar las mediciones de las variables o bien un personal capacitado como supervisor revisará los equipos cuando se esté produciendo los lotes. Además de implementar acciones preventivas y correctivas designando el personal a cargo, fecha de inicio de implementación y fin de implementación.

A su vez debemos realizar una identificación y trazabilidad de las salidas por medio del etiquetado de lotes y códigos de identificación de los lotes para llevar a cabo un control, registrando estos en una bitácora que contendrá:

- i. número de lote producido.
- ii. Fecha y hora en que fue producido dicho lote.
- iii. Responsable del turno.
- iv. Folio de los documentos de las pruebas de calidad ASTM como evidencia de conformidad con sus respectivos criterios de aceptación de cada prueba.
- v. Nombre del cliente u organización solicitante.

7.6 salidas no conformes

Las salidas que no cumplan con alguna de las normas de calidad propuestas en este trabajo escrito no serán empacadas ni liberadas para su entrega al cliente, a menos de obtener la autorización de aceptación por su parte tras informarle las razones de la no conformidad.

Si este rechaza el producto por no cumplir con los estándares de calidad, a pesar de haber sido informado al respecto, se procederá a separarlo del resto de los productos o lotes fabricados. Se documentará la prueba de calidad no aprobada y se registrará la variable del proceso relacionada. Después, se tratará el producto rechazado como un retorno al proceso para fabricar aleaciones similares. En este caso no es posible realizar una rectificación al producto, como lo sugiere la norma en su cláusula 8.7.1 inciso a) “corrección” dado que son partículas muy pequeñas y finas.

Como mencionamos debemos realizar documentación la cual debe contener lo siguiente:

- a) descripción de la no conformidad.
- b) acciones tomadas para el tratamiento de la no conformidad.
- c) quien decide la acción tomada con respecto a dicha no conformidad.

8. Conclusiones.

Los polvos metálicos y en general la mayoría de los productos provenientes de estos deben ser fabricados con alta calidad, ya que de esta depende el desempeño y las propiedades mecánicas de las piezas que vayan a ser fabricadas por el cliente.

Uno de los puntos importantes de implementar un sistema de gestión de calidad es la reducción de los costos y por lo tanto una mejora en el rendimiento. El establecimiento de controles y criterios en cada uno de los subprocesos para al final obtener el polvo metálico deseado guiado por las directrices de la cláusula 8 “Operación”, asistidas de normas internacionales como las ASTM proporciona una confianza adicional, a su vez nuestros polvos metálicos producidos le proporcionan confianza al cliente.

La implementación de un sistema de gestión de calidad les permite a todas aquellas empresas que no son grandes corporaciones o empresas reconocidas iniciar su camino hacia un mercado más competitivo y ser reconocidas al igual que sus competidores directos.

Los clientes objetivo son aquellas empresas que manufacturan piezas metálicas a partir de polvos metálicos, a las cuales les proveeremos nuestro producto cumpliendo los requisitos y especificaciones técnicas provistas por este, posicionándonos en el mercado de la producción de polvos metálicos como materia prima para las demás empresas dedicadas a piezas metálicas diversas.

Referencias.

1. Wikiwand - Dirección General de Normas (México). (s. f.-b). Wikiwand. Recuperado 16 de marzo de 2023, de [https://www.wikiwand.com/es/Direcci%C3%B3n General de Normas \(M%C3%A9xico\)](https://www.wikiwand.com/es/Direcci%C3%B3n%20General%20de%20Normas%20(M%C3%A9xico))
2. Díaz Carrillo, E. (s. f.). 3. *SISTEMAS NORMATIVOS*. [Diapositivas; Electrónico]
3. Martínez Castañeda, F. & FQ, Departamento de Biología. (2023, 30 enero). *¿Cómo interpretar una norma?* [Vídeo]. Classroom. Recuperado 16 de marzo de 2023, de https://drive.google.com/file/d/1hZyPm2l_q2NwoWOkpFtrf6KE_oUQPwT/view?usp=drive_web&authuser=0
4. Secretaría de Economía. (2019, 23 febrero). *¿Sabes que es la normalización?* gobierno de México. Recuperado 14 de marzo de 2023, de <https://www.gob.mx/se/articulos/sabes-que-es-la-normalizacion-192107?idiom=es>
5. Panel y Acanalados Monterrey. (2022, 8 agosto). *La guía más completa sobre las normas ASTM para el acero y la construcción*. Panel y Acanalados monterrey. Recuperado 15 de marzo de 2023, de <https://panelyacanalados.com/blog/normas-astm-para-el-acero-y-otros-materiales-de-construccion/>
6. *detailed overview*. (s. f.). ASTM International. Recuperado 14 de marzo de 2023, de <https://www.astm.org/about/overview/detailed-overview.html>
7. ASTM International. (s. f.). *Overview - About Us*. ASTM International. Recuperado 13 de marzo de 2023, de <https://www.astm.org/about/overview.html>
8. ASTM international. (s. f.). *Governance - About Us*. Recuperado 15 de marzo de 2023, de <https://www.astm.org/about/governance.html>
9. ISO. (s. f.). *ISO - About us*. Recuperado 15 de marzo de 2023, de <https://www.iso.org/about-us.html>
10. Procem Consultores [Procem Consultores]. (2020, 2 julio). *¿Qué es la ISO?* [Vídeo]. Youtube. Recuperado 16 de marzo de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=gj3WipVn4NQ>

11. Procem Consultores [Procem Consultores]. (2019, 8 abril). *¿Qué son las normas ISO?* [Vídeo]. Youtube. Recuperado 16 de marzo de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=QrWsBj6ARG0>
12. Upadhyaya, A., & Upadhyaya, G. S. (2010). *Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials* [Impreso]. Baldev Raj.
13. German, R. M. (2005). *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing* [Electrónico].
14. Connor, N. (2021, 14 septiembre). *¿Qué es la corrosión? Definición | Propiedades materiales*. Material Properties. <https://material-properties.org/es/que-es-la-corrosion-definicion/>
15. ASM committee. (1988). *ASM handbook: Casting* (9.ª ed., Vol. 15) [Impreso]. ASM International.
16. Shackelford, J. F., Güemes, A., & Comas, N. M. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*.
17. Islas Chávez, A. (2008). *Molienda de óxidos suaves* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
18. *Engineering Toolbox*. (s.f.) *Thermal Conductivity of common materials and gases*. Recuperado el 12 de mayo de 2023, de https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
19. *Engineering Toolbox*. (s.f.) *Thermal Conductivity of common materials and gases*. Recuperado el 12 de mayo de 2023, de https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
20. *National institute of standards and technology (NIST)*. (s.f.). *Nitrogen*. Recuperado el 12 de mayo de 2023, de <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7727379&Mask=4>
21. ASM INTERNATIONAL (Ed.). (1992). *ASM handbook: Alloy phase diagrams* (Vol. 3) [Electrónico]. Hugh Baker
22. ASM international. (1981). *ASM handbook: Heat treating* (9.ª ed., Vol. 4) [Electrónico].
23. Faustino, J. S. (2010). *Apuntes para el laboratorio de beneficios de minerales* [Impreso]. Facultad de Química, UNAM.
24. ASTM international, (2015), *Standard Practices for Sampling Metal Powders*, Designation: B215-15.
25. ASTM International, (2022), *Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders*, Designation: B214-22.

26. ASTM International, (2002), Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering, Designation: B822-02.
27. ASTM International, (2013). ASTM B212-13 Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel. Designation: B212-13.
28. ASTM International, (2013). ASTM B213-13 Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel. Designation: B213-13.
29. ASTM International, (2016). ASTM B331-16 Standard Test Method for Compressibility of Metal Powders in Uniaxial Compaction. Designation: B331-16