

Aleaciones mecánicas

Variables del proceso de molienda

Pablo E. Alanís

13 de agosto de 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León, División de Posgrado
Técnicas de preparación de materiales

Variables del proceso de molienda

Tipos de molinos

Contenedor del molino

Forma del contenedor

Velocidad/intensidad de molienda

Tiempo de molienda

Medio de molienda

Relación de bolas-polvo (BPR)

Grado de llenado del vial

Outline ii

Atmósfera de molienda

Agentes de control del proceso (PCA)

Temperatura

Variables del proceso de molienda

Aleaciones mecánicas

- El proceso de *aleación mecánica* (AM) es complejo;

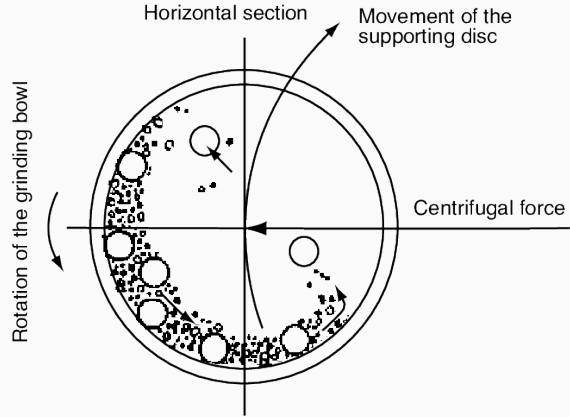


Figura 1: Esquema del proceso de molienda en un molino de bolas.

- El proceso de AM es complejo;
- para obtener el producto deseado, se tienen que *optimizar* las condiciones de reacción.

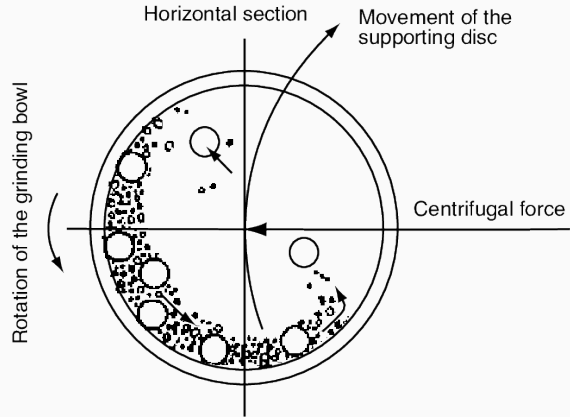


Figura 1: Esquema del proceso de molienda en un molino de bolas.

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo de molino;*

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad de molienda*;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo de molienda*;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;
- *relación en masa de bolas-polvo*;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;
- *relación* en masa de bolas-polvo;
- *que tan lleno está el vial;*

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;
- *relación* en masa de bolas-polvo;
- *que tan lleno* está el vial;
- *atmósfera* de molienda;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;
- *relación* en masa de bolas-polvo;
- *que tan lleno* está el vial;
- *atmósfera* de molienda;
- *agente de control del proceso*;

Variables del proceso

Entre algunas de las variables que afectan la fase del producto final obtenido, se encuentran:

- *tipo* de molino;
- *contenedor* del molino;
- *velocidad* de molienda;
- *tiempo* de molienda;
- *tipo, tamaño y distribución* del medio de molienda;
- *relación* en masa de bolas-polvo;
- *que tan lleno* está el vial;
- *atmósfera* de molienda;
- *agente de control* del proceso;
- *temperatura* de molienda.

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;
por ejemplo: el tiempo de molienda óptimo puede depender de:

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;
por ejemplo: el tiempo de molienda óptimo puede depender de:
 1. tipo de molino;

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;
por ejemplo: el tiempo de molienda óptimo puede depender de:
 1. tipo de molino;
 2. tamaño del medio de molienda;

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;
por ejemplo: el tiempo de molienda óptimo puede depender de:
 1. tipo de molino;
 2. tamaño del medio de molienda;
 3. temperatura de molienda;

Las variables no son aisladas

- Estas variables no son necesariamente independientes;
por ejemplo: el tiempo de molienda óptimo puede depender de:
 1. tipo de molino;
 2. tamaño del medio de molienda;
 3. temperatura de molienda;
 4. **relación bolas-polvo, etc.**

Variables del proceso de molienda

Tipos de molinos

- Existen varios tipos de molinos que pueden usarse según el propósito;

Selección de un molino

- Existen varios tipos de molinos que pueden usarse según el propósito;
- Estos varían en:

Selección de un molino

- Existen varios tipos de molinos que pueden usarse según el propósito;
- Estos varían en:
 1. capacidad;

Selección de un molino

- Existen varios tipos de molinos que pueden usarse según el propósito;
- Estos varían en:
 1. capacidad;
 2. velocidad de operación;

Selección de un molino

- Existen varios tipos de molinos que pueden usarse según el propósito;
- Estos varían en:
 1. capacidad;
 2. velocidad de operación;
 3. capacidad para controlar la temperatura.

Capacidades de los molinos

Según la cantidad de polvo que se requiera sintetizar, se pueden utilizar diferentes molinos:

- Para propósitos de *screening* se puede utilizar un molino tipo SPEX.



Capacidades de los molinos

Según la cantidad de polvo que se requiera sintetizar, se pueden utilizar diferentes molinos:

- Para propósitos de *screening* se puede utilizar un molino tipo SPEX.
- Para producir grandes cantidades de polvo se puede utilizar un molino tipo Fritsch Pulverisette planetario.



Cuadro 1: Comparación de tipos de molinos convencionales en función a cantidades de material que pueden procesar.

Tipo de molino	Tamaño de muestra
Molino mezclador	Hasta dos de 20 g
Molino planetario	Hasta cuatro de 250 g
Molino de atrición	0,5 kg a 100 kg
Molino de bolas	Hasta cuatro de 2000 g

Variables del proceso de molienda

Contenedor del molino

Importa el material del contenedor

- *El material* del contenedor del molino es un factor muy importante a considerar.

- *El material* del contenedor del molino es un factor muy importante a considerar.
 1. Puede influir en *que tan contaminada* pueda estar nuestra fase metaestable.

- *El material* del contenedor del molino es un factor muy importante a considerar.
 1. Puede influir en *que tan contaminada* pueda estar nuestra fase metaestable.
 2. Si ambos tienen el mismo material, puede alterar la composición química del polvo.

Materiales convencionales

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;

Materiales convencionales

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;
- acero cromado reforzado;

Materiales convencionales

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;
- acero cromado reforzado;
- acero templado;

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;
- acero cromado reforzado;
- acero templado;
- **acero inoxidable;**

Materiales convencionales

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;
- acero cromado reforzado;
- acero templado;
- acero inoxidable;
- WC—Co

Materiales convencionales

Entre los materiales más comunes para contenedores con aplicaciones en molinos se encuentran:

- acero reforzado;
- acero cromado reforzado;
- acero templado;
- acero inoxidable;
- WC—Co
- acero recubierto de WC.

Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

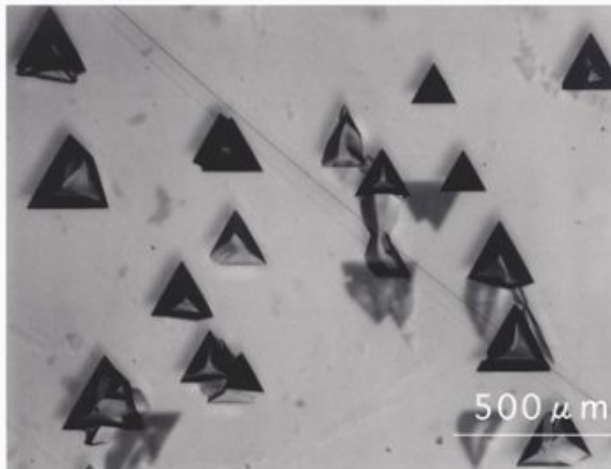
- cobre;
- titanio;



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;
- porcelana dura;



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

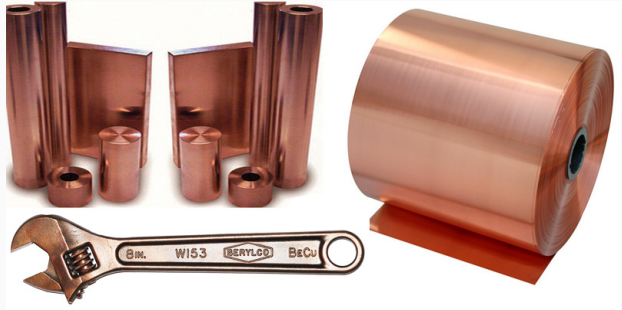
- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;
- porcelana dura;
- Si_3N_4



Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;
- porcelana dura;
- Si_3N_4
- Cu—Be



Variables del proceso de molienda

Forma del contenedor

- La forma del contenedor puede afectar en los tiempos de molienda drásticamente.

- La forma del contenedor puede afectar en los tiempos de molienda drásticamente.
- para los molinos SPEX existen *contenedores de fondo plano* y *contenedores de fondo redondo*

- La forma del contenedor puede afectar en los tiempos de molienda drásticamente.
- para los molinos SPEX existen *contenedores de fondo plano* y *contenedores de fondo redondo*
- El tiempo requerido para que se llegara a la misma intensidad en un pico en XRD en (111) fue de:
 1. 9 h en el contenedor de fondo plano;
 2. 15 h en el contenedor de fondo redondo.

Forma del contendor

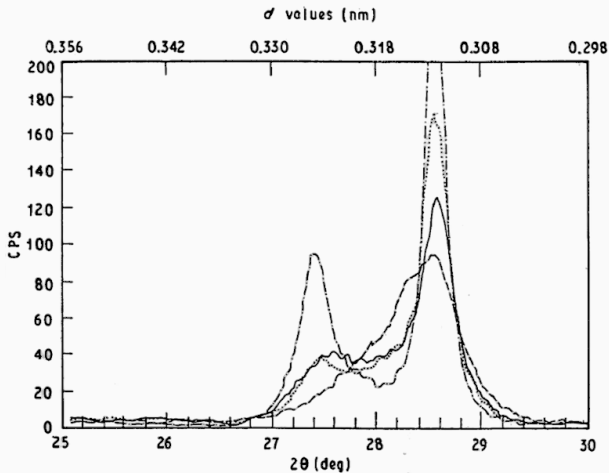


Figura 2: Efecto del uso de un contenedor de fondo plano vs uno de fondo redondo. (---) 3 h y (···) 6 h en vial redondo; (—) 3 h (- - -) 6 h en vial con fondo plano. (Obtenido de Harringa, Cook y Beaudry 1999)

Variables del proceso de molienda

Velocidad/intensidad de molienda

Velocidad crítica, C_s :

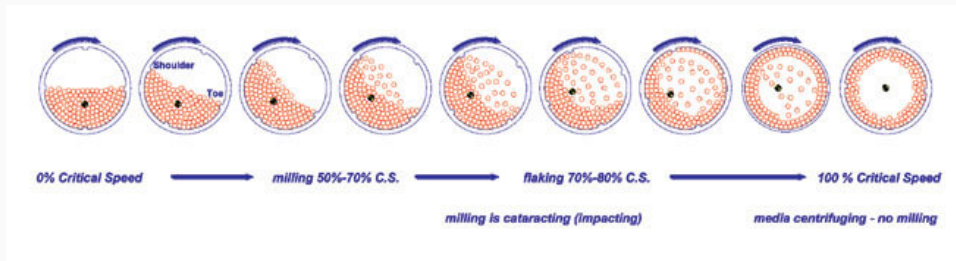
En un molino de bolas, la *velocidad crítica* (C_s) es la velocidad en la que el medio de molienda se adhiere, a causa de la fuerza centrífuga, a las paredes del contenedor. La fórmula de la velocidad crítica es:

$$C_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{g}{R - r}} \quad (1)$$

Donde g es la constante gravitacional, R es el diámetro interno del molino y r el diámetro de un trozo de medio de molienda.

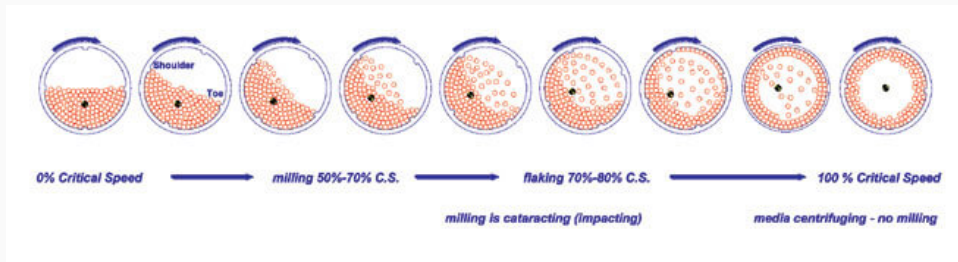
Velocidad crítica del molino

- A velocidades mayores que la *velocidad crítica* las bolas estarían sujetas al contenedor y no causarían ningún impacto;



Velocidad crítica del molino

- A velocidades mayores que la *velocidad crítica* las bolas estarían sujetas al contenedor y no causarían ningún impacto;
- la velocidad debe ser ajustada para que sea menor que la *velocidad crítica*.



- Los molinos de bolas secos operan en un rango de 50 % a 70 % de la C_s ;

Rangos de operación

- Los molinos de bolas secos operan en un rango de 50 % a 70 % de la C_S ;
- normalmente se operan de 60 % a 65 %;

Rangos de operación

- Los molinos de bolas secos operan en un rango de 50 % a 70 % de la C_s ;
- normalmente se operan de 60 % a 65 %;
 1. a $\leq 50\%$ C_s la energía es muy poca para *fracturar el polvo*;

Rangos de operación

- Los molinos de bolas secos operan en un rango de 50 % a 70 % de la C_s ;
- normalmente se operan de 60 % a 65 %;
 1. a $\leq 50\% C_s$ la energía es muy poca para *fracturar el polvo*;
 2. a $\geq 70\% C_s$ el medio comienza a caer en *catarata*, golpeando una sola zona del contenedor.

Una de las consecuencias de moler a *altas velocidades* es que la *temperatura del medio aumenta*.

Ventajas de una mayor velocidad

- Puede promover la homogeneidad y/o aleaciones de polvos.

Desventajas de una mayor velocidad

- acelera la transformación del proceso, resultando en descomposición de la fase deseada;

Desventajas de una mayor velocidad

- acelera la transformación del proceso, resultando en descomposición de la fase deseada;
- se pueden formar otras fases metaestables indeseadas;

Desventajas de una mayor velocidad

- acelera la transformación del proceso, resultando en descomposición de la fase deseada;
- se pueden formar otras fases metaestables indeseadas;
- incrementa el riesgo de contaminación de polvos.

Obtención de fases en función de la velocidad

En algunas investigaciones, se han reportado *cambios en la morfología* en función de la *velocidad*:¹

Cuadro 2: Relación de la velocidad con las fases obtenidas

Fase obtenida	Velocidad de molienda
Ni–Zr (amorfo)	Alta velocidad
Ni–Zr (cristalino)	Velocidad media y baja

¹Calka y Radlinski 1991.

Variables del proceso de molienda

Tiempo de molienda

Factores que influyen en el tiempo de molienda

- Es el factor más importante;
- el tiempo de molienda depende de:
 1. tipo de molino;
 2. intensidad de molienda;
 3. relación bolas-polvo (BPR);
 4. temperatura de molienda.

Desventajas de un mayor tiempo de molienda

- Se debe de limitar el tiempo de *molienda solo al necesario*²

²Suryanarayana 1995.

Desventajas de un mayor tiempo de molienda

- Se debe de limitar el tiempo de *molienda solo al necesario*²
- A mayor tiempo de molienda, más posibilidad de contaminación.

²Suryanarayana 1995.

Desventajas de un mayor tiempo de molienda

- Se debe de limitar el tiempo de *molienda solo al necesario*²
- A mayor tiempo de molienda, más posibilidad de contaminación.
- Mayor posibilidad de degradar el polvo.

²Suryanarayana 1995.

- Hay mayor contaminación a mayor tiempo de molienda;
- esto es especialmente aplicable a contenedores/medios de molienda reactivos, como:³
 - Ti;
 - ZrO₂.

³Suryanarayana 2004, pág. 64.

Variables del proceso de molienda

Medio de molienda

- Una correcta selección del medio de molienda es crucial;
 - tamaño;
 - distribución de tamaños.

Medios de molienda convencionales

Entre los materiales más comunes para su uso en medios de molienda, se encuentran:

- acero reforzado;
- acero;
- acero cromado reforzado;
- acero templado;
- acero inoxidable;
- WC—Co;
- acero para rodamientos.

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- **titano;**

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)
- ágata;

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)
- ágata;
- YSZ;

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)
- ágata;
- YSZ;
- zafiro;

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)
- ágata;
- YSZ;
- zafiro;
- nitruro de silicio (Si_3N_4);

Medios de molienda especializados

Así como con los contenedores, también se pueden usar medios de molienda para usos especializados:

- cobre;
- titano;
- niobio;
- zirconia (ZrO_2)
- ágata;
- YSZ;
- zafiro;
- nitruro de silicio (Si_3N_4);
- Cu–Be;

- Se ha determinado que en condiciones suaves de molienda (bolas más pequeñas, menor energía y menor BPR) favorece la formación de fases metaestables.⁴

⁴Suryanarayana et al. 1999.

⁵Gerasimov et al. 1991.

- Se ha determinado que en **condiciones suaves** de molienda (bolas más pequeñas, menor energía y menor BPR) favorece la formación de **fases metaestables**.⁴
- por el contrario, al usar condiciones más duras, se favorece la formación de fases menos metaestables o de fases en equilibrio.⁵

⁴Suryanarayana et al. 1999.

⁵Gerasimov et al. 1991.

- Se ha determinado que en condiciones suaves de molienda (bolas más pequeñas, menor energía y menor BPR) favorece la formación de fases metaestables.⁴
- por el contrario, al usar condiciones más duras, se favorece la formación de fases menos metaestables o de fases en equilibrio.⁵

⁴Suryanarayana et al. 1999.

⁵Gerasimov et al. 1991.

Variables del proceso de molienda

Relación de bolas-polvo (BPR)

BPR en función del tamaño de muestra

- Se ha estudiado de 1:1⁶ hasta 220:1⁷
- normalmente se usa una BPR de 10:1 para molinos de poca capacidad como un SPEX;
- para attritores se puede usar desde 50:1 hasta 100:1

⁶Chin y Perng 1996.

⁷Kis-Varga y Beke 1996.

BPR en función del tiempo

- A mayor BPR, menor tiempo de molienda

Cuadro 3: Variación de BPR y el tiempo necesario para sintetizar Ti-33 %Al amorfo.

BPR	Tiempo
10:1	7 h
50:1	2 h

Condiciones de molienda y su influencia en las fases obtenidas

Condiciones de molienda

Cuadro 4: Condicones de molienda y fases obtenidas.

Condiciones de molienda	Fase obtenida
<i>Suaves</i>	fases metaestables
<i>Duras</i>	fases en equilibrio

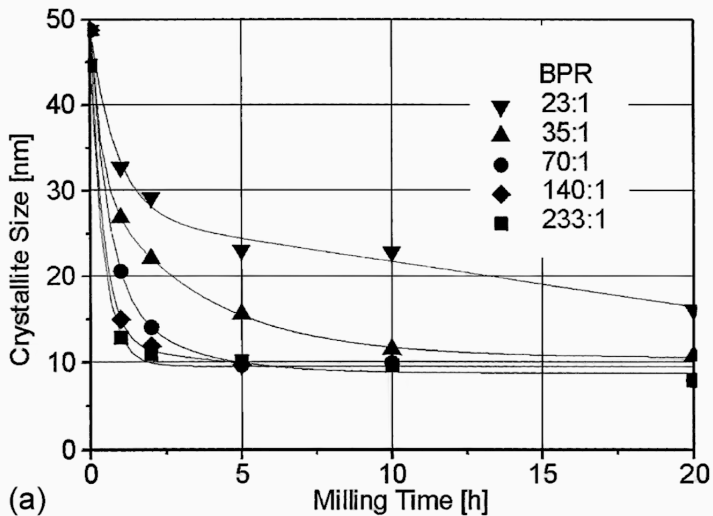


Figura 3: Influencia del BPR en el tamaño del polvo a diferentes tiempos. (*Adaptado de Suryanarayana (2004, pág. 68)*).

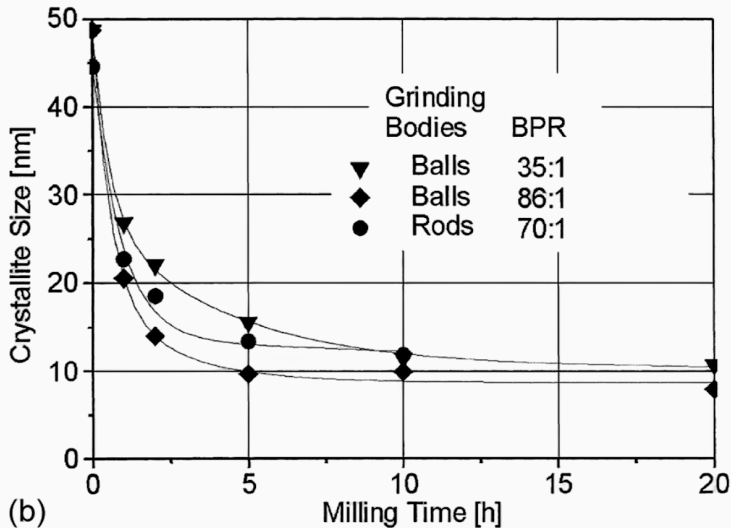


Figura 4: Influencia del BPR y la forma del medio de molienda en el tamaño del polvo a diferentes tiempos. (Adaptado de Suryanarayana (2004, pág. 68)).

Variables del proceso de molienda

Grado de llenado del vial

- Ya que la molienda depende del impacto de las bolas con el polvo, no puede llenarse por completo el vial;
- se recomienda llenarlo $\leq 50\%$.

Variables del proceso de molienda

Atmósfera de molienda

La influencia de la atmosfera de molienda

- Es de los principales contribuyentes a la contaminación;
- se evita llenando con gas inerte el contenedor;
- comúnmente se usa argón para evitar la oxidación.

- *No es común que se use nitrógeno;*
 1. *se puede utilizar nitrógeno o amoníaco para producir nitruros;*⁸
 2. *se puede utilizar hidrógeno para producir hidruros.*⁹

⁸Andrzej Calka y J. Williams 1992.

⁹Chen y J. R. Williams 1996.

- La atmósfera puede influir en la morfología obtenida:
- Ogino et al. (1990) determinó que para la preparación de Cr–Fe:
 1. en atmósfera de argón se presentaban picos de XRD correspondientes a Cr;
 2. en aire-Ar y en nitrógeno se formaba una fase amorfa.

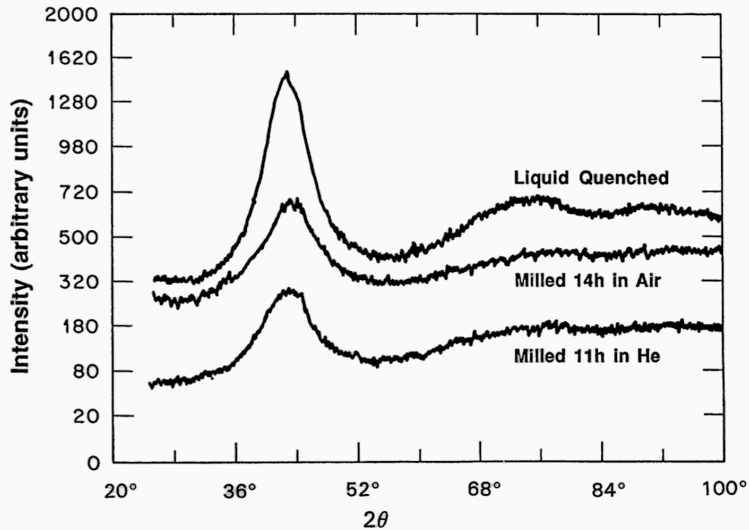


Figura 5: Efecto de la atmosfera en la cristalinidad del polvo.

Variables del proceso de molienda

Agentes de control del proceso (PCA)

- Solo se puede obtener una aleación adecuada si se mantiene una relación adecuada entre fracturas de partículas y soldadura en frío;

- Se usan agentes de control del proceso (PCA) para reducir la soldadura en frío;
 - estos pueden ser sólidos, líquidos o gases;
 - el PCA se absorbe en la superficie del polvo
 - inhibe la aglomeración
- en práctica, se usa 1% a 5 %m.

Variables del proceso de molienda

Temperatura

La temperatura define la constitución

- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;

¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.

La temperatura define la constitución

- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;
 - a mayor temperaturas:¹⁰

¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.

La temperatura define la constitución

- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;
 - a mayor temperaturas:¹⁰
 - se obtienen menor RMS del estrés de las nanopartículas;

¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.

La temperatura define la constitución

- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;
 - a mayor temperaturas:¹⁰
 - se obtienen menor RMS del estrés de las nanopartículas;
 - menor tamaño de grano.

¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.

La temperatura define la constitución

- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;
 - a mayor temperaturas:¹⁰
 - se obtienen menor RMS del estrés de las nanopartículas;
 - menor tamaño de grano.
 - a menor temperatura:¹¹

¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.



La temperatura define la constitución




- La difusión es un proceso involucrado en la formación de las fases;
 - a mayor temperaturas:¹⁰
 - se obtienen menor RMS del estrés de las nanopartículas;
 - menor tamaño de grano.
 - a menor temperatura:¹¹
 - hay evidencia contradictoria, pero en teoría se favorece la *amorficidad*.


¹⁰Hong, Bansal y Fultz 1994.

¹¹H. Kimura y M. Kimura 1989.


Referencias

-  Calka, A y A.P Radlinski (mar. de 1991). **“Universal High Performance Ball-Milling Device and Its Application for Mechanical Alloying”**. En: *Materials Science and Engineering: A* 134, págs. 1350-1353. ISSN: 09215093. DOI: 10/dkwp9q.
-  Calka, Andrzej y J.S. Williams (ene. de 1992). **“Synthesis of Nitrides by Mechanical Alloying”**. En: *Materials Science Forum* 88–90, págs. 787-794. ISSN: 1662-9752. DOI: 10/b45vb6.

-  Chen, Yi y John R. Williams (jul. de 1996). **“Hydriding Reactions Induced by Ball Milling”**. En: *Materials Science Forum* 225–227, págs. 881–888. ISSN: 1662-9752. DOI: 10/cnt47h.
-  Chin, Z.-H. y T.P. Perng (oct. de 1996). **“Amorphization of Ni-Si-C Ternary Alloy Powder by Mechanical Alloying”**. En: *Materials Science Forum* 235–238, págs. 121–126. ISSN: 1662-9752. DOI: 10/d44hkv.
-  Gerasimov, K. B. et al. (1991). **“Tribochemical Equilibrium in Mechanical Alloying of Metals”**. En: *Journal of Materials Science* 26.9, págs. 2495–2500. ISSN: 0022-2461, 1573-4803. DOI: 10/bbd7xv.

-  Harringa, J. L., B. A. Cook y B. J. Beaudry (feb. de 1992). **“Effects of Vial Shape on the Rate of Mechanical Alloying in $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$ ”**. En: *Journal of Materials Science* 27.3, págs. 801-804. ISSN: 0022-2461, 1573-4803. DOI: 10/dx2s3p.
-  Hong, L.B., C. Bansal y B. Fultz (dic. de 1994). **“Steady State Grain Size and Thermal Stability of Nanophase Ni_3Fe and Fe_3X (X = Si, Zn, Sn) Synthesized by Ball Milling at Elevated Temperatures”**. En: *Nanostructured Materials* 4.8, págs. 949-956. ISSN: 09659773. DOI: 10/bfzw9m.
-  Kimura, Hiroshi y Masayoshi Kimura (1989). **“Processing Control for Solid State Amorphization of CoZr by Reaction Ball Milling.”**. En: *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy* 36.6, págs. 662-667. ISSN: 0532-8799, 1880-9014. DOI: 10/fcxb7n.

-  Kis-Varga, Miklos y Dezső L. Beke (jul. de 1996). “**Phase Transitions in Cu-Sb Systems Induced by Ball Milling**”. En: *Materials Science Forum* 225–227, págs. 465-470. ISSN: 1662-9752. DOI: 10/fd6cx6.
-  Ogino, Yoshiaki et al. (feb. de 1990). “**Non-Equilibrium Phases Formed by Mechanical Alloying of Cr–Cu Alloys**”. En: *Journal of Non-Crystalline Solids* 117–118, págs. 737-740. ISSN: 00223093. DOI: 10/d92mbn.
-  Suryanarayana, C. (ene. de 1995). “**Does a Disordered γ -TiAl Phase Exist in Mechanically Alloyed TiAl Powders?**” En: *Intermetallics* 3.2, págs. 153-160. ISSN: 09669795. DOI: 10/c7z4dp.
-  — (2004). ***Mechanical Alloying and Milling***. Materials Engineering 22. New York: Marcel Dekker. 466 págs. ISBN: 978-0-8247-4103-7.

-  Suryanarayana, C. et al. (feb. de 1999). **“Phase Selection in a Mechanically Alloyed Cu₂₀13;In–Ga–Se Powder Mixture”**. En: *Journal of Materials Research* 14.2, págs. 377-383. ISSN: 0884-2914, 2044-5326. DOI: [10/c7wjcq](https://doi.org/10.1115/1.2817100).