

# Aleaciones mecánicas

## Variables del proceso de molienda

---

Pablo E. Alanís

12 de agosto de 2023

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

## Variables del proceso

---

- El proceso de *aleación mecánica* es complejo;

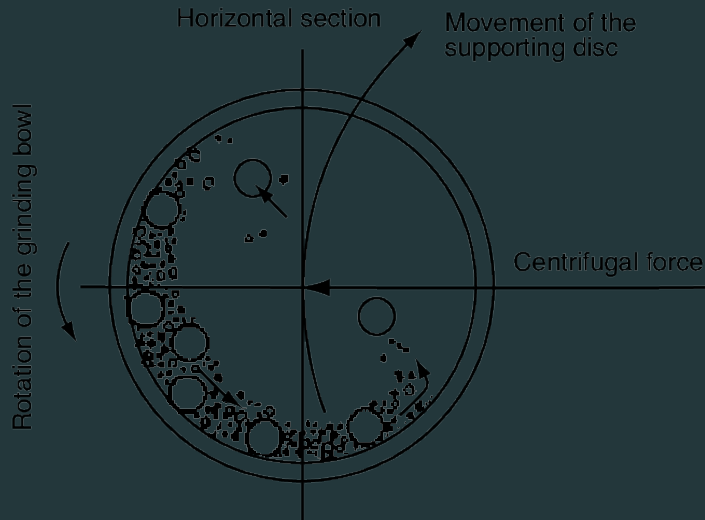


Figura 1: Esquema del proceso de molienda en un molino de

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

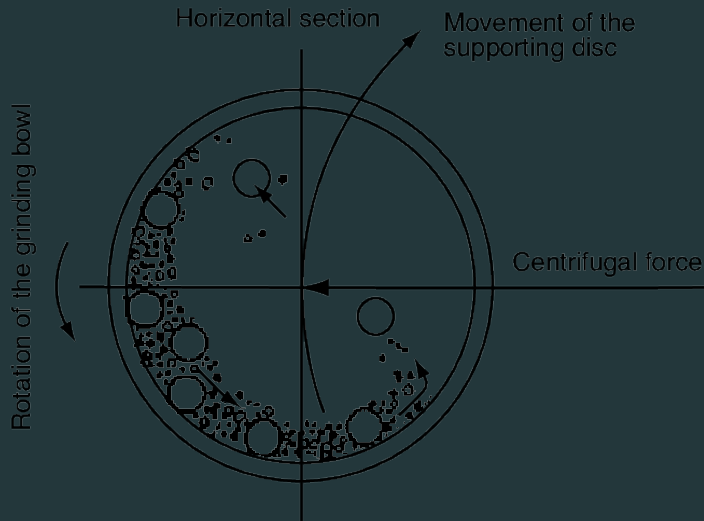


Figura 1: Esquema del proceso de molienda en un molino de

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.

- 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.

- 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

---

Tipo de molino



# Tipos de molinos

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

## Capacidades de los molinos — Comparación

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
Attritores	0,5 kg a 100 kg
Molinos Uni-ball	Hasta cuatro de 2000 g

## Variables del proceso

---

Tipo de molino

- 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 tiene el mismo material, puede alterar la composición química del polvo.

## Materiales convencionales

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

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

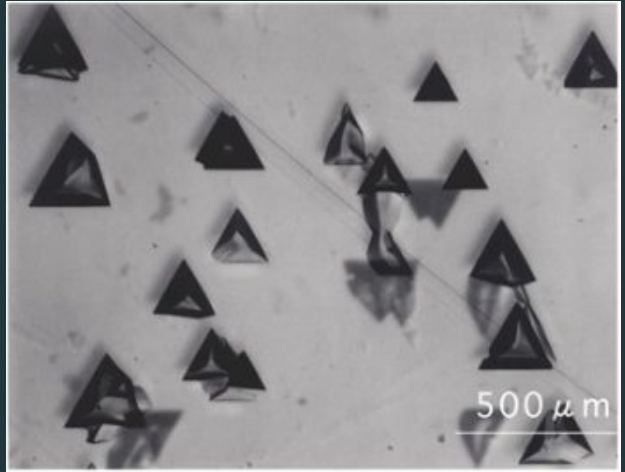




# Materiales para propósitos especiales

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

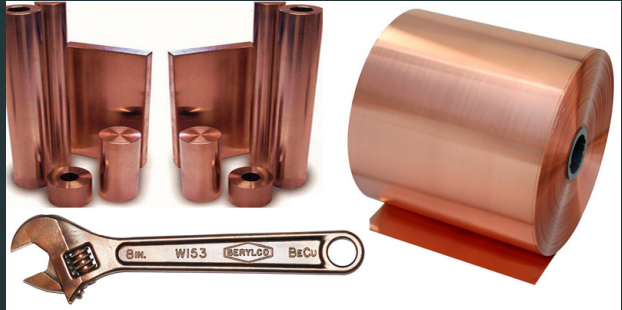
## Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;
- porcelana dura;
- $\text{Si}_3\text{N}_4$

# Materiales para propósitos especiales

Contenedores de materiales para propósitos especializados:

- cobre;
- titanio;
- safíro;
- agata;
- porcelana dura;
- $\text{Si}_3\text{N}_4$
- Cu—Be



## Forma del contenedor

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

## Forma del contenedor

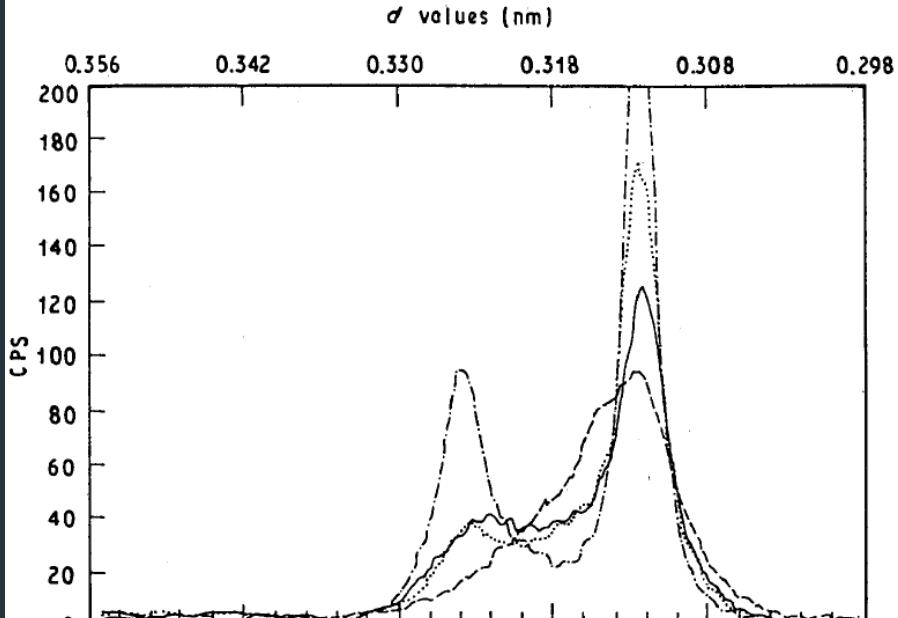
- La forma del contenedor puede afectar en los tiempos de molienda drásticamente.
- para los molinos SPEX existen *contenedores de fondo plano* y *contenedores de fondo redondo*

## Forma del contenedor

- 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



# Velocidad de molienda

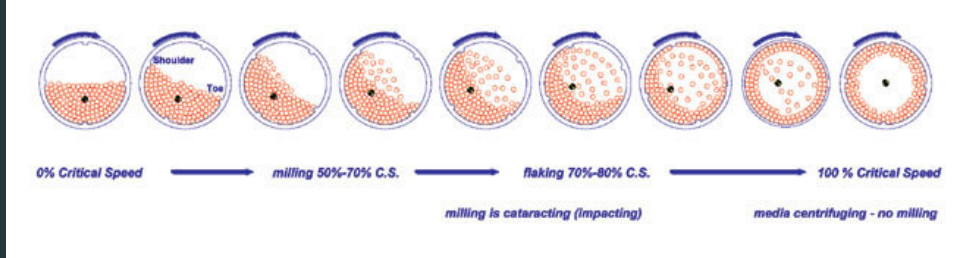
## Velocidad crítica, $C_s$ :

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:

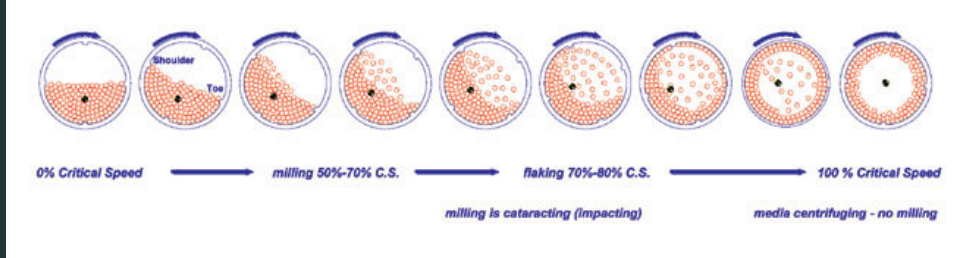
$$C_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{g}{R - r}} \quad (1)$$

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

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



- 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*.



## Velocidad de molienda

- 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*.

En ciertos casos es provechoso:

- promover la homogeneidad y/o aleaciones de polvos.

O bien, puede ser un problema:

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

O bien, puede ser un problema:

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



O bien, puede ser un problema:

- 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.

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

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

---

<sup>1</sup>Calka y Radlinski 1991.

## Variables del proceso

---

Tiempo de molienda

# 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;
  4. temperatura de molienda.

- Se debe de limitar el tiempo de *molienda solo al necesario*<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Suryanarayana 1995.

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

---

<sup>2</sup>Suryanarayana 1995.



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

---


<sup>2</sup>Suryanarayana 1995.

## Referencias

---

-  Calka, A y AP Radlinski (1991). **“Universal high performance ball-milling device and its application for mechanical alloying”**. En: *Materials Science and Engineering: A* 134, págs. 1350-1353.
-  Harringa, JL, BA Cook y BJ Beaudry (1992). **“Effects of vial shape on the rate of mechanical alloying in  $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$ ”**. En: *Journal of materials science* 27, págs. 801-804.



 Suryanarayana, C. (1995). **“Does a disordered  $\gamma$ -TiAl phase exist in mechanically alloyed TiAl powders?”** En: *Intermetallics* 3.2, págs. 153-160. ISSN: 0966-9795. DOI: [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)92680-X](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)92680-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096697959592680X>.