



**VNIVERSIDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

**MEMORIA DE INNOVACIÓN DOCENTE 2014~2015**

**“APLICACIÓN DE AVTOMATISMOS A  
LOS PROCESOS DE MOLIENDA”**

**PDI RESPONSABLE: NATIVIDAD ANTÓN IGLESIAS**

**ID2014/0134**

**D. PROYECTOS IMPULSADOS POR UN PROFESOR Y/O VINCULADOS A UN GRUPO DE PROFESORES.**

**II. INCORPORACIÓN DE RECURSOS PARA ACTIVIDADES PRÁCTICAS.**

## 1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Uno de los objetivos principales de este proyecto fue dotar de nuevo equipamiento para realizar prácticas adaptadas para dos titulaciones: los grados de Ingeniería de Materiales y de Ingeniería Mecánica. Este hecho entronca directamente con la necesidad de establecer una doble titulación entre ambas ingenierías tan relacionadas entre sí.

En el presente proyecto se ha propuesto diseñar prácticas que sirvan a los estudiantes para adquirir las competencias en automatismos y control de los procesos básicos como son la trituración y molienda de distintos materiales (campo que aúna la Ingeniería de Materiales y la Ingeniería Mecánica) en la asignaturas de "Obtención y Selección de Materiales", "Procesado de Materiales", "Utilización y Reciclado de Materiales" del Grado de Ingeniería de Materiales; y por otro lado "Teoría de mecanismos", "Ampliación de cálculo y diseño de máquinas", "Fundamentos de automática y regulación y control" del Grado en Ingeniería Mecánica todas ellas impartidas en la Escuela Politécnica Superior de Zamora. La idea es poder diseñar prácticas que sirvan para ambas titulaciones y en el futuro sirvan para la doble titulación.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología ha sido la siguiente:

1. Búsqueda de información relativa a los procesos de trituración y molienda de diversos tipos de materiales.
2. Acopio de materias primas susceptibles de ser empleadas en las prácticas.
3. Planificación de las modificaciones sobre los molinos existentes en el Laboratorio

de Ciencia de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Zamora.

4. Elementos necesarios para realizar la tarea 2 (Tabla 1):

Tabla 1. Elementos necesarios para la modificación de los molinos.

Concepto	TOTAL
Autómata programable LOGO 24	150
Tarjeta de expansión I/O digital	50
Elementos eléctricos (contactores, relés, cable, interruptores,...)	30
Sensor inductivo M12	30
Elementos Mecánicos	40
SUMAS TOTALES	300

El proyecto de innovación ID2014/O134 (II. Incorporación de recursos para actividades prácticas) fue aprobado en la convocatoria pero no por eso respaldado económicamente, con lo cual no ha sido posible realizar las modificaciones. Las tareas que se propusieron fueron las siguientes:

1. Diseño del dispositivo. Optimización y alternativa más económica.
2. Elaboración del proyecto de ejecución (materiales, planos, etc.)
3. Adquisición de materiales y componentes.
4. Implementación de los automatismos que controlarán los molinos de bolas. Montaje y evaluación de prototipo (capacidades, seguridad, etc.)
5. Modificaciones.
6. Puesta en servicio. Evaluación de las posibles alternativas para trabajar con los molinos de bolas (control de velocidad, carga de material, vueltas por minuto, tipo de material a moler, etc.)

7. Realización de un histórico de ensayos que sirva para realizar los guiones de prácticas.
8. Evaluaciones de las actitudes del equipo para proyectos de I+D+i.

### 3. TAREAS DESARROLLADAS

La primera de las tareas a desarrollar fue el Diseño del dispositivo. Optimización y alternativa más económica. En la petición ya estaba reseñado el número mínimo de elementos necesarios para llevar a cabo las modificaciones, aunque se realizaron intentos para hacer otros modelos no fructificaron y se llegó a la conclusión de que era necesario la compra de los elementos reseñados en la Tabla 1.

Aun así, se hizo acopio de distintas materias primas (tanto cerámicos, metales, etc.) para tener muestras susceptibles de hacer las prácticas.

De igual forma se realizó la parte teórica del guion de prácticas (borrador) a partir de una revisión realizada.

## GUIÓN DE PRÁCTICAS. TEORÍA

### TRITURACIÓN Y MOLIENDA.

La molienda de materiales, ya sean duros, frágiles, blandos o dúctiles, es de interés fundamental y tiene una gran importancia económica en la industria. La molienda mecánica es el método más extendido para la producción de polvos distintos materiales.



Figura 1. Acopio de distintos materiales para la realización de las prácticas.

La molienda mecánica se aplica generalmente a los materiales cerámicos o minerales, pero también a metales relativamente duros, metales frágiles (por ejemplo, hierro electrolítico o bismuto), algunos metales reactivos como el berilio e hidruros metálicos, los metales dúctiles (como el aluminio) son usados para la producción de escamas de metal o copos. El interés en obtener polvos con tamaños de partícula más finos que los producidos por atomización ha reactivado el interés en la molienda, particularmente en la aleación en estado sólido o la molienda de alta energía. Los principales objetivos de la molienda en distintos campos (más concretamente en la Pulvimetalurgia):

- ◊ Reducción del tamaño de partícula.
- ◊ Cambio de forma (escamas).
- ◊ Aglomeración o crecimiento del tamaño de partícula.
- ◊ Aleación en estado sólido (aleación mecánica).
- ◊ Mezcla en estado sólido (aleación incompleta).
- ◊ Modificación, cambio o alteración de las propiedades del material.
- ◊ Mezcla de dos o varios metales o fases.
- ◊ Procesos de amorfización.

La operación de molienda fractura, deforma (trabajo en frío), o suelda en frío las partículas. La molienda también pueda producir transformaciones polimórficas, como en el caso del óxido de plomo y el acero inoxidable. El efecto específico que la molienda tiene en el polvo depende de las propiedades físicas y químicas del polvo, y de las condiciones y el medio en el que se realiza la molienda.

La molienda de polvos de metal puede producir modificaciones en la forma y textura y cambios internos de estructura. La extensión de estos cambios está determinada ampliamente por los parámetros de molienda, ambiente de molienda, y propiedades físicas y químicas del metal o aleación que está siendo molida. Estos cambios afectan a las propiedades físicas del metal que está siendo molido. Las características de los polvos asociadas con la molienda incluyen:

Características externas:

- ◊ Forma.
- ◊ Textura.
- ◊ Reflectividad.
- ◊ Tamaño de partícula y distribución del tamaño de partícula.

#### Características internas:

- ◊ Estructuras compuestas o aglomerados compuestos.
- ◊ Trabajo en frío (Energía almacenada).
- ◊ Alta densidad de dislocaciones.
- ◊ Mejora de la homogeneidad (aleaciones).
- ◊ Estructuras finas (estructuras laminares).
- ◊ Refinamiento del tamaño del cristal, tamaño de grano nanocrystalino.
- ◊ Incorporación de gases y fluidos de la atmósfera de molienda.

#### Características Físicas:

- ◊ Propiedades mecánicas (resistencia a la deformación y dureza).
- ◊ Propiedades físicas (resistividad).
- ◊ Propiedades químicas (corrosión).
- ◊ Propiedades de los polvos metálicos (densidad aparente, fluidez, sinterabilidad, compresibilidad, y densidad de sinterizado)

El conocimiento de las variables que influyen en las características del producto molido pueden ser usadas para mejorar las características del producto y las propiedades del material y alcanzar nuevas aplicaciones para distintos sectores.

#### **LEYES DE MOLIENDA**

En los últimos 50 años muchas han sido las publicaciones referidas al tema de la relación energía-reducción de tamaño, la mayoría de ellas se apoya en las denominadas leyes de trituración y molienda. Esto denota que la descripción matemática de la dependencia entre energía consumida en la molienda y reducción de tamaño de los trozos minerales, está en la preferencia de los científicos e investigadores del tema.

Las primeras investigaciones referidas a esta temática (Rittinger, 1867; Kick, 1883), estuvieron dirigidas a una mejor comprensión de los fenómenos que tienen lugar en la molienda; estos investigadores defendieron la posición de explicar la molienda de minerales desde la relación energía-reducción de tamaño. En este sentido, la reducción del tamaño se estudió como función del área de la superficie de la partícula nuevamente formada, el volumen del material molido y el diámetro.

- **Primera ley de la molturación o ley de Von Rittinger:** en el año 1867 propone en su modelo que el área de la superficie nuevamente formada es proporcional a la energía consumida en la molienda.

- **Segunda ley de molturación o ley de Kick:** o teoría del desmenuzamiento en volumen o peso se puede enunciar diciendo que el trabajo que se absorbe para provocar modificaciones semejantes en la configuración de dos partículas geoméricamente similares y del mismo material sería proporcional a la reducción en volumen.

- **Tercera ley de la molturación o ley de Bond:** F.C. Bond supone que la energía requerida para el desmenuzamiento es intermedia entre las dadas por las fórmulas de Rittinger y de Kick. Introduce lo que define como "Índice de Trabajo" ( $W_i$ ). El índice de trabajo puede hallarse experimentalmente en laboratorio a través de ensayos de molienda para los distintos materiales. La ley de Bond se usa con frecuencia para realizar el diseño de circuitos de molienda, dado que se conoce la constante  $W_i$  para bastantes materiales.

Ninguna de estas leyes se adapta a la realidad, y son hoy en día principalmente de interés histórico. Experimentos posteriores demostraron que en el proceso de reducción de tamaño, la energía consumida por unidad de masa es proporcional a las pequeñas variaciones del tamaño de las partículas, y que la energía requerida para lograr dichas variaciones es inversamente proporcional a una función dada del tamaño inicial del material. En 1975 Hukki sugirió que la relación energía consumida-tamaño de la partícula es una combinación de las tres leyes:

$$dE = -K dl/l^n$$

donde  $l$  es el tamaño de la partícula y  $E$  es la energía consumida en la molienda.

### FUERZAS QUE ACTÚAN DURANTE LA MOLIENDA

Durante la molienda, actúan sobre las partículas del material cuatro tipos de fuerzas principales:

- **Impacto:** Causado por la aceleración de las partículas o de la herramienta de molienda, es ejercido de forma instantánea.
- **Cortadura:** Ocurre entre superficies dotadas de canto vivo, las cuales pueden ser móviles o unas fijas y otras móviles.
- **Desgaste:** Ejercido por el roce entre dos cuerpos produciendo partículas.
- **Compresión:** Ocurre entre superficies, las cuales pueden ser móviles o unas fijas y otras móviles.

### MECANISMOS DE LA MOLIENDA

Los cambios en la morfología de la partícula que ocurren durante la molienda de los polvos de distintos materiales pueden ser provocados por:

- **Microforja:** El proceso inicial y predominante durante la molienda es la deformación de partículas dúctiles de metal por el impacto de los medios de molienda.
- **Fractura:** Después de un tiempo de molienda, las partículas son deformadas hasta el punto en que las fisuras inician su propagación y finalizan con la fractura de las partículas.
- **Aglomeración:** Ocurre entre las partículas por mecanismos de soldadura o entrelazamiento mecánico de superficies esponjosas o rugosas, o por adhesión.

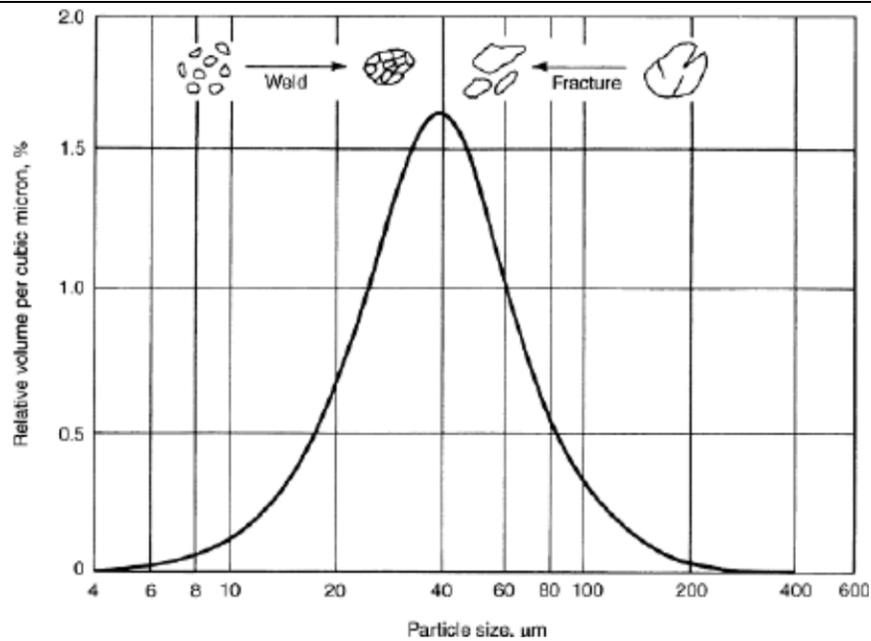


Figura 2. Distribución del tamaño de partícula donde se observa la tendencia a unirse por soldadura la partículas pequeñas y la tendencia a fracturarse de las partículas grandes.

## PARÁMETROS DE MOLIENDA

La molienda es un proceso complejo y a menudo conlleva la optimización de un número de variables para alcanzar el producto deseado. Algunos de los parámetros más importantes que afectan a las características finales del polvo son:

- ◊ Tipo de molino: Bolas, de alta energía, de rodillos, etc.
- ◊ Medio de molienda; aire, agua, distintos dispersantes como alcoholes, etc.
- ◊ Recipiente del molino; tamaño, forma, material de fabricación, etc.
- ◊ Velocidad de molienda.
- ◊ Tiempo de molienda.
- ◊ Atmósfera de molienda: Aire (oxidante), reductora, nitrurante, etc.
- ◊ Temperatura de molienda.

Todas estas variables de proceso no son completamente independientes, por ejemplo el tiempo de molienda óptimo depende del tipo de molino, del tamaño del medio de

molienda, de la temperatura, de la relación entre la carga de bolas y polvo.

### MOLINOS DE BOLAS

La parte principal de un molino de bolas es el tambor o casco de forma cilíndrica, diseñado para soportar los impactos de las bolas y la carga. El tambor es soportado por unos ejes fijos solidarios a él sobre los que gira, la longitud del tambor del molino y su diámetro determinan la capacidad del molino. Las caras de trabajo internas del tambor del molino suelen estar provistas de revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga.



Figura 3. Molinos disponibles en el Laboratorio de Ciencia de Materiales.

### Volumen de llenado del molino

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza y cantidad del material que se introduce en el molino. Por ejemplo, para dos procesos de molienda en el que en uno de ellos se introduce más carga a moler que en el otro es necesario introducir más bolas en el que tiene más carga a moler para obtener los mismos resultados en el mismo tiempo. El cálculo de la fracción o nivel de llenado para un molino de forma cilíndrica puede hacerse una vez que se conoce la altura desde la superficie de la carga hasta el tope del molino. Se denomina  $H$  a esa altura y  $D$  al diámetro interno del molino.

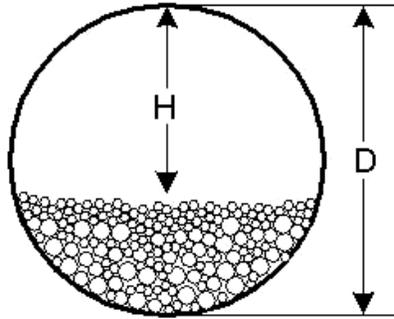


Figura 4. Relación de llenado en función del diámetro.

La relación matemática con la que se determina el % de llenado de bolas es:

$$\% = 1,13 - 1,23 (H/D)$$

Comúnmente varía entre 0,25 – 0,45

El material a moler (M) se sitúa entre los huecos de las bolas, se usa la relación entre su volumen y el de los espacios vacíos dentro de la carga de bolas (V) Esta relación se conoce como razón del material a espacio vacío. Si el material sólido y el medio de suspensión (agua, aire, entre otros.) llenan exactamente los huecos entre bolas, la razón M/V vale 1. Las cargas de los medios de molienda varían de 20 a 50% en la práctica y en general, las razones M/V se aproximan a 1.

#### **Velocidad crítica de un molino de bolas**

La velocidad crítica es la velocidad mínima a la cual los medios de molienda y la carga centrifugan y no tienen un movimiento relativo entre si es decir, que la fuerza centrífuga generada por la rotación es igual a la fuerza que la gravedad ejerce sobre la bola.

La velocidad Crítica (NC) se determina con la siguiente ecuación: '

$$N_c = 42,3/(D - d')^{1/2}$$

donde  $N_c$  es la velocidad crítica en rpm,  $D$  es el diámetro del molino,  $d'$  es el diámetro del medio de molienda, las bolas.

## Tamaño de los medios de molienda

Uno de los factores principales que determinan el tamaño de las bolas de molienda es el grado de finura del material que se quiere moler, cuanto más grueso es el material se requieren tamaños de bola mayores, para minerales varían entre 140 y 90 cm.

## Mecanismos de pulverización

Se dice que los medios de molienda efectúan movimientos de cascada y catarata. El primero de ellos se aplica al rodado de bolas o piedras de la parte superior hacia la base del montón, y el segundo al lanzamiento de bolas por el aire hasta la punta del montón. El movimiento de la masa de bolas y material según la velocidad de rotación se refleja en las siguientes figuras.

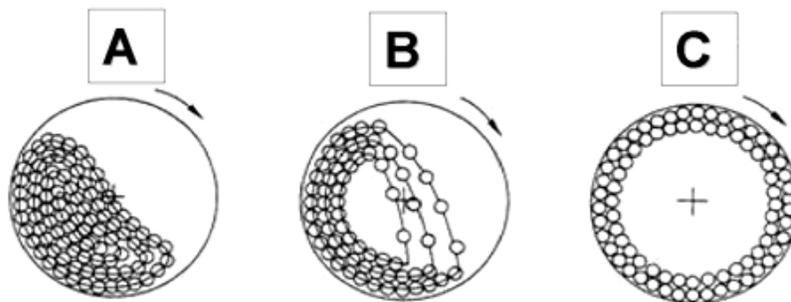


Figura 5. Mecanismos de pulverización.

A.- Velocidad reducida: rotación en la parte interior del cilindro de las bolas y el material.

B.- Aumento de la velocidad: Las bolas ascienden adheridas al cilindro hasta una altura en la cual su peso sobrepasa la fuerza centrífuga y caen al fondo de la cámara sobre el material.

C.- Las bolas debido la fuerza centrífuga giran pegadas a la pared del cilindro.

## Impacto de bolas

El proceso de impacto se muestra en la figura 1, el modelo representa el momento de la colisión, mediante el cual las partículas son atrapadas entre los medios de molienda

(bolas) El espacio entre las bolas está ocupado por una nube densa, por una dispersión o masa de partículas del polvo. Este fenómeno es típico en las operaciones de molienda húmeda y seca que usan medio de molienda como los molinos atritor o los de bolas.

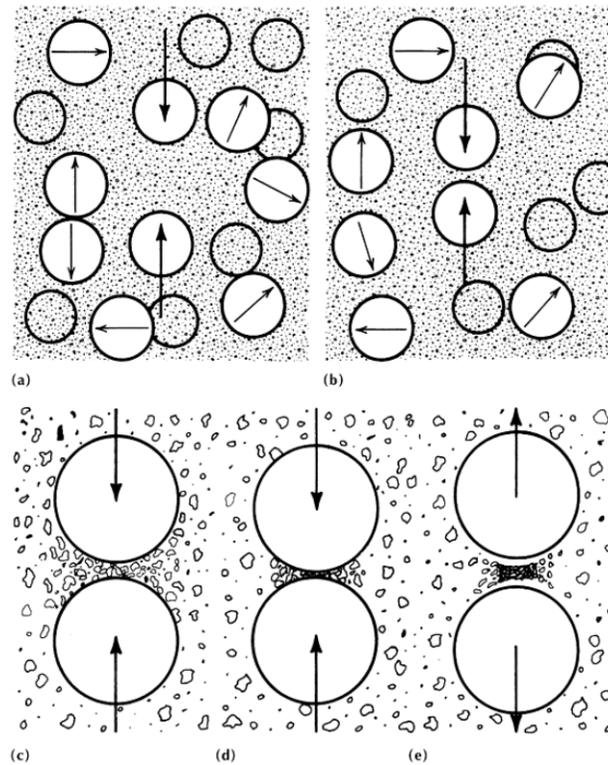


Figura 6. Proceso de machaqueo entre bolas.

En la figura se representa el proceso mediante el cual un volumen de polvo es atrapado entre dos bolas en una carga de polvo y bolas agitadas aleatoriamente sin rotación:

- ◊ a) Carga de polvo y bolas agitado aleatoriamente.
- ◊ b) Acercamiento de las bolas a través del medio.
- ◊ c) Atrapamiento y compactación de partículas.
- ◊ d) Aglomeración.
- ◊ e) Relajación de la aglomeración de partículas debido a la energía elástica.