

## Molienda industrial de esmaltes.

### Conceptos generales sobre la molienda

El término molienda puede ser aplicado genéricamente a cualquier operación tecnológica que comporte una **reducción del tamaño de partícula** de una sustancia o una mezcla de sustancias. Según el grado de reducción que se logre se conoce la molienda con diferentes nombres, aunque esto varía mucho según el sector industrial y el país.

- En general, nos referiremos a un proceso de **quebrantado**, al que produce un tamaño medio de partícula de entre 6 y 0,5 milímetros (mm). Se trata de una molienda gruesa propia de las primeras etapas del proceso de preparación de pastas, y es ajena por completo a la preparación de esmaltes.
- La **molienda fina** produce partículas con tamaños que podrían abarcar desde los 0,5 milímetros hasta unos pocos micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).
- En la **micronización** se llega a tamaños de milésimas de micra o nanómetros. La reducción del tamaño de partícula en estos intervalos de valores, se realizará utilizando los equipos especiales.

### Objetivos de la molienda

Las objetivos de la molienda del esmalte son los siguientes:

- **Homogeneizar la composición.** La homogeneización de todos los componentes es necesaria para garantizar la uniformidad de las características técnicas y estéticas del esmalte.
- **Aumentar la velocidad de reacción.** La velocidad a la que se realizan las reacciones entre los sólidos o entre éstos y la fase vítrea fundida depende de su composición y de su distribución de tamaños. Una granulometría fina conlleva un aumento de los puntos de contacto entre los sólidos y de la superficie de los sólidos expuesta al ataque del vidrio fundido, lo que implica un aumento de la velocidad de reacción.
- **Permitir la aplicación de los esmaltes.** La mayor parte de los esmaltes se aplican por vía húmeda. En algunas técnicas, como la serigrafía o la aerografía, el esmalte debe pasar a través de secciones muy pequeñas, como las aberturas del tejido de la pantalla serigráfica o la boquilla de la pistola empleada en aerografía, por lo que deben tener unos tamaños que lo permitan.

### Molienda industrial de esmaltes con molinos de bolas.

La molienda industrial de grandes cantidades de esmaltes y de engobes se realiza en molinos de bolas discontinuos, llamados molinos "Alsing" (figura 1) que son cilindros metálicos cerrados, cubiertos interiormente con un revestimiento altamente resistente al desgaste y al impacto, y cargados hasta su mitad de elementos molturantes, generalmente esféricos o irregulares. Estos molinos giran el sobre su eje y el movimiento rotatorio hace que los elementos molturantes, comúnmente llamados "bolas", situados en las capas más externas, se levanten y caigan en cascada provocando la molienda por impacto. En cambio, las bolas interiores no alcanzan suficiente velocidad para levantarse y caer en cascada, y se deslizan unas sobre otras en la parte interior del molino, provocando allí la molienda por rozamiento o abrasión.

#### 1. Elementos constructivos de un molino de bolas

Posemos distinguir dos elementos estructurales definidos en este tipo de molinos: la estructura fija y la parte móvil.



Figura 1. Molino de bolas.  
Fotografía: Rafa Galindo.

**a) Estructura fija.**

Son los elementos de anclaje y sujeción del molino, el grupo transmisor del movimiento, y las instalaciones y accesorios para la carga y descarga.

- **Estructura de fijación.** Consta de dos fuertes bases laterales, que forman lo que se denomina la bancada del molino. Para molinos grandes la bancada se construye habitualmente en hormigón y para los pequeños, es decir hasta unos 5000 litros de volumen, de estructura metálica.
- **Grupo de transmisión del movimiento.** Consta de un motor reductor con posibilidad de selección de velocidad, cuentagiros con parada automática y los mecanismos de transmisión del movimiento, de arranque y de frenada.
- **Dispositivos de carga.** Los grandes molinos se instalan en batería y se construye sobre ellos una plataforma como la que ves en la figura 1. Según el grado de automatización y las necesidades de fabricación, esta plataforma puede ir equipada con tolvas para la carga del molino que a su vez son cargadas mediante una instalación de cintas transportadoras.
- **Instalaciones de seguridad.** Los molinos deben ir rodeados de una valla de seguridad como la que ves en la figura 1, con puertas dotadas de mecanismos de bloqueo y frenada del molino en caso de apertura accidental cuando el molino está en marcha.

**b) Estructura móvil.**

La estructura móvil del molino de bolas está formada por una **carcasa cilíndrica metálica** equipada con un **revestimiento interior liso** o dotado de **elevadores**, que puede ser de bloques de sílex recortados en formas rectangulares, bloques de porcelana, cerámica aluminosa, esteatita, alúmina o láminas y anclajes de caucho. En la siguiente tabla puedes ver algunas de las características de estos revestimientos:

Tipo de revestimiento	Material	Propiedades físicas	
		Peso específico (g/cc)	Espesor aproximado (mm)
Bloques de piedra silíceo	Sílex	2,65	12
Cerámica	Porcelana	2,70	6
	Esteatita	2,75	6
	Cerámica aluminosa	2,75	6
	Alúmina sinterizada	3,0 a 3,4	5
Goma	Caucho sinterizado	-	3

Es importante que te fijes en el espesor de cada tipo de revestimiento. Es un dato importante porque a igualdad de dimensiones externas, cuanto menor sea el espesor mayor será el volumen útil del molino, es decir, a menores espesores de revestimiento mayor aprovechamiento del espacio disponible. En este sentido, es indudable la ventaja que ofrecen los revestimientos de caucho, de un espesor sensiblemente inferior al resto.

Fíjate también en el peso específico de cada componente. Con la excepción del caucho, el peso específico está en relación directa con las características mecánicas de cada revestimiento, de manera que los más resistentes, es decir los que sufren menores desgastes, son aquellos que tienen un mayor peso específico. Como puedes ver, cuanto más resistente es un material, menor es el espesor del revestimiento y, por tanto, mayor es el aprovechamiento del volumen del molino.

En el interior del molino se disponen **elementos molturantes** o "bolas" de diferentes tamaños, de sílex, esteatita o alúmina hasta algo más de la mitad del diámetro del molino. El tamaño y el peso de las bolas está muy relacionado con su acción molturante, por lo que la carga de bolas, es decir, la cantidad que ponemos de cada tamaño de bolas, tiene una gran importancia porque influye mucho en el mecanismo de molienda predominante, y, por tanto, en el resultado final.

En la práctica, las cargas de elementos molturantes se hacen con dos o tres tamaños diferentes de bolas como puedes ver en la siguiente tabla:

Tipo de elemento molturante	Material	Propiedades físicas		
		Peso específico (g/cc)	Forma	Diámetros aprox. (mm)
Piedras silíceas	Sílex	2,65	Irregulares	--
Cerámica	Porcelana	2,70	Esféricas	Pequeñas: 30 mm. Medianas: 40 a 60 mm. Grandes: 70 mm
	Esteatita	2,75		
	Cerámica aluminosa	2,75		
	Alúmina sinterizada	3.0 a 3,4		Pequeñas: 30 mm. Medianas: 40 a 50 mm. Grandes: 60 mm

Es conveniente que los elementos molturantes tengan la misma composición que los revestimientos de los molinos, para evitar el desgaste del material más blando de los dos.

En el molino de bolas discontinuo, las bolas suelen ocupar un volumen aparente igual al 55 % del volumen útil del molino, es decir, ocupan algo más de la mitad del volumen del molino, aunque has de tener en cuenta que entre las bolas aún queda volumen por ocupar. La relación entre el volumen que realmente ocupan las bolas y el volumen aparentemente ocupado se denomina "relación de empaquetamiento" y para las distribuciones de bolas habitualmente empleadas en la industria cerámica, es de un 65 % del volumen aparente.

#### Carga específica de bolas.

La **carga específica** de un molino de bolas es igual al peso de bolas que se carga por unidad de volumen útil del molino. Se expresa habitualmente en kg/m<sup>3</sup>.

#### 2. Criterios de carga del molino de bolas.

Se definen dos criterios, carga máxima y carga mínima, referidos al volumen de barbotina obtenida, y a partir de estos criterios y conociendo el contenido en sólidos y la densidad de ésta, se determina el peso de sólidos máximo y mínimo.

- a) **Criterio de carga mínima.** El volumen de barbotina mínimo ( $V_{min}$ ) debe llenar siempre todos los huecos existentes entre los cuerpos molturantes (figura 2). Fíjate que si obtenemos menos barbotina, cuando el molino gire se darán muchos impactos entre bolas, que sólo producen desgaste de éstas, pero no molienda.

La cantidad de barbotina que cabe entre las bolas es aproximadamente un 20 % del volumen útil.

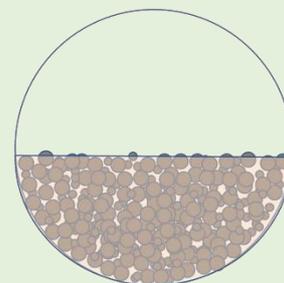


Figura 2. Criterio de carga mínima.

- b) **Criterio de carga máxima.** El volumen de barbotina máximo ( $V_{max}$ ) debe ser tal que deje un 25 % del volumen útil libre (figura 3). Si dejamos menos volumen, es decir si llenamos más el molino, es necesario un mayor tiempo de molienda por lo que al final el molino produce menos aunque en cada molienda hayamos aumentado la carga. Esto significa que el volumen útil del molino se reparte entre el volumen que queda libre, que es un 25 % del volumen útil, el volumen ocupado por las bolas y el volumen de barbotina y, por tanto, la cantidad máxima de barbotina que podemos obtener en una molienda es aproximadamente un 40 % del volumen útil.

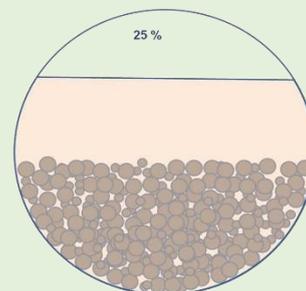


Figura 3. Criterio de carga máxima.

Como puede deducirse fácilmente de estos criterios, el volumen de barbotina que puede obtenerse en cada molienda oscila entre el 20 % (carga mínima) y el 40 % (carga máxima) del volumen útil del molino.

### 3. Funcionamiento del molino de bolas.

#### a) Mecanismo de molienda.

El movimiento rotatorio del molino hace que los elementos molturantes más externos, en algunos molinos ayudados por los elevadores, que son relieves de la pared interna del revestimiento, se levanten y caigan en cascada provocando entonces la molienda por **impacto**. En cambio, las bolas interiores no alcanzan suficiente velocidad para levantarse y caer en cascada, y se deslizan unas sobre otras en la parte interior del molino, provocando la molienda por **rozamiento o abrasión**.

#### b) Velocidad crítica de un molino de bolas.

La máxima velocidad a la que debe girar un molino de bolas es aquella a la que ya empiezan a centrifugar las bolas más alejadas del centro, es decir a seguir trayectorias pegadas al revestimiento interno. Esta velocidad se denomina "**velocidad crítica**" ( $n_c$ )

Así pues, la velocidad crítica de un molino de bolas es la **velocidad a la que empieza a centrifugar la capa más externa de elementos molturantes**.

La velocidad crítica ( $n_c$ ) depende del diámetro útil del molino ( $D_{ut}$ ). La velocidad crítica, expresada en revoluciones por minuto (r.p.m.) se puede calcular mediante esta fórmula:

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D_{ut}}}$$

#### c) Velocidad óptima de un molino de bolas.

Es conveniente conocer cuál es la velocidad de rotación óptima a la que ha de girar un molino, aunque este no suele ser un parámetro de regulación ya que generalmente los fabricantes los instalan con una velocidad determinada fija y no regulable. Las velocidades óptimas aconsejadas oscilan entre el 50 % y el 65 % de la velocidad crítica según el tipo de elementos molturantes en molinos de diámetro pequeño. En molinos de diámetro superior a 1,4 metros se ha calculado, también empíricamente, las velocidades de rotación óptimas. Todos estos datos los tienes en la siguiente tabla:

Diámetro del molino (m)	Tipo de elementos molturantes	Velocidad óptima de rotación (r.p.m.)
D < 1,4 m	Elementos molturantes de baja densidad ( $\rho_b < 3 \text{ g/cc}$ ).	$n_{op} = 0,51.n_c$
	Elementos molturantes de alta densidad ( $\rho_b \geq 3 \text{ g/cc}$ ).	$n_{op} = 0,65.n_c$
D > 1,4 m	Elementos molturantes de baja densidad ( $\rho_b < 3 \text{ g/cc}$ ).	$n_{op} = 30/D_{ut}$
	Elementos molturantes de alta densidad ( $\rho_b \geq 3 \text{ g/cc}$ ).	$n_{op} = 27/D_{ut}$