



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO INGENIERÍA QUÍMICA

**PRÁCTICA: MOLIENTA Y TAMIZADO**

**OBJETIVOS**

**Generales**

Determinar el comportamiento de un molino de bolas en la disminución del tamaño de partícula en un sólido.

**Específicos**

- ✓ Realizar el análisis granulométrico diferencial y acumulativo para el alimento y para el producto.
- ✓ Realizar la molienda de un producto en un molino de bolas.

**FUNDAMENTO TEÓRICO**

**MOLIENDA EN MOLINOS GIRATORIOS**

En la figura 1 se representa un molino giratorio típico. Consta de una carcasa cilíndrica que gira lentamente alrededor de un eje horizontal y que está lleno hasta la mitad de su volumen con un elemento sólido de molienda, como por ejemplo bolas de acero, pedernal o porcelana. El molino de bolas tiene, por regla general, una longitud corta no muy diferente de su diámetro. Es fácil de operar y sus aplicaciones son muy versátiles. Pueden operar en continuo o por lotes. En un sistema por lotes, se coloca una determinada cantidad del sólido a través de una abertura en la carcasa. Se cierra ésta y se hace girar el molino durante varias horas; luego se detiene y se descarga. En un molino continuo, el sólido fluye estacionariamente a través de la carcasa giratoria, entrando por un extremo a través de un orificio y saliendo por el extremo opuesto.

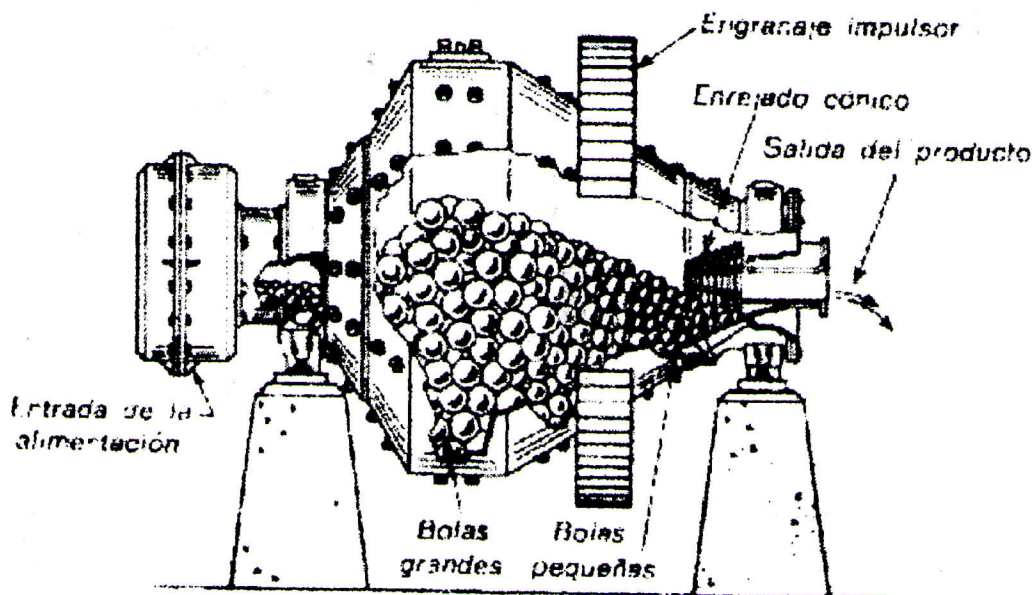


FIGURA 1. Molino de bolas cónico

El principio de operación del molino es sencillo: los elementos de molienda permanecen unidos a la carcasa, aproximadamente hasta la altura máxima, de donde caen sobre las partículas que están debajo (ver figura 2). La energía gastada para elevar los elementos de molienda, se utiliza para reducir el tamaño de las partículas. Aunque también hay reducción de tamaño por abrasión entre las piedras, al moverse unas contra las otras, este mecanismo tiene menor incidencia que el señalado anteriormente.

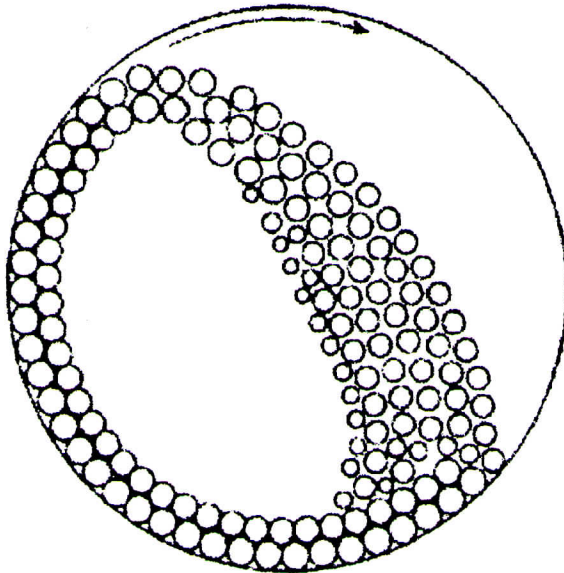


FIGURA 2. Operación de un molino de bolas.

Durante la operación, las bolas siguen un recorrido cíclico. Como se muestra en la figura 2, las bolas son arrastradas en el interior del molino, casi hasta la cima, en donde pierden el contacto con la pared y caen al fondo para volver a empezar el ciclo. La fuerza centrífuga mantiene las bolas en contacto con la pared y consigo mismas durante el movimiento ascendente. Cuanto más rápidamente gira el molino tanto más suben las bolas y tanto más es el consumo de energía y la potencia comunicada, hasta un valor máximo, en el que las bolas ya no se desprenden de la pared porque la fuerza centrífuga es mayor que la gravedad. En ese momento la operación del molino se hace casi totalmente ineficiente. La velocidad de giro a la que las partículas ya no caen de la pared en la parte superior, se conoce como velocidad crítica y viene dada por la expresión:

$$N_{\text{crítica}} = 29,9 \sqrt{\frac{1}{R - r}}$$

En donde  $N_{\text{crítica}}$  está dada en RPM,  $R$  es el radio del molino en metros y  $r$  es el radio de la bola, también en metros.

Los factores de control que regulan la eficiencia de molienda en molinos de bolas son:

- La velocidad del molino afecta la capacidad en una proporción directa, hasta el 85% de la velocidad crítica.
- La carga de bolas, la cual no debe superar el 50% del volumen del cilindro.
- El tamaño de las bolas. Las bolas de tamaño mínimo que sean capaces de moler el material dan una eficiencia máxima.

La razón de material de molienda a bolas, también afecta significativamente la eficiencia de molienda, y debe estudiarse en términos volumétricos y/o de peso.

## **EQUIPO**

### **Molino de bolas.**

El molino de bolas que se utiliza en esta práctica corresponde al definido en la norma ASTM D-3802, Determinación de la dureza de carbón activado (Ver Anexo) y consiste en un tamiz especialmente adaptado para tal fin. La malla del tamiz se reemplazó por una lámina de bronce de 3mm de espesor y dureza 60 HRB. En su interior se cargan 15 esferas de acero de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y 15 esferas de acero de  $\frac{1}{2}$  pulgada. El molino se monta sobre un juego de 5 tamices que tiene como única función servir de soporte. El conjunto se ubica sobre el sistema de agitación, que se mantiene en funcionamiento durante 30 minutos.

### **Sistema de tamizado.**

El equipo consta de un conjunto de tamices; cuyas medidas se indican en la tabla número 1. Los tamices se montan ajustados a presión uno encima de otro, formando una hilera de 6 más tapa y el plato (fondos) que permite la recolección de los sólidos más finos. En la parte superior del juego de tamices se coloca la tapa, la cual tiene un sistema que recibe el golpe del sistema de agitación, seguido por los tamices ordenados de mayor a menor apertura, y el plato de recolección de los sólidos más finos.

El conjunto de tamices se ubica sobre el agitador de tamices, que consta de un motor con una leva que acciona un martillo a una velocidad constante de 140 golpes por minuto. Al caer, se descarga sobre la tapa del sistema de tamices, produciendo una vibración que permite el movimiento vertical de la carga, lo que facilita el paso de a través de las diferentes mallas hasta llegar a una malla con apertura inferior al diámetro de las partículas. El tiempo de tamizado es 10 minutos. Finalmente, se pesa el contenido de cada uno de los tamices y del plato de retención de los finos.

## **PROCEDIMIENTO**

### **1. Determinación de la distribución del tamaño de partícula del alimento**

Mezcle bien el producto y tome una muestra de 100 g del material seleccionado para la práctica. Seleccione un juego de tamices conveniente y cargue el producto en el plato superior. Ponga la tapa y coloque el conjunto en el sistema de agitación de tamices.

Realice el tamizado durante 10 minutos y pese los sólidos retenidos sobre cada tamiz (Ver Norma ASTM D-2862, Distribución de Tamaño de Partícula de Carbones Activados Granulados).

### **2. Carga al molino y proceso de molienda**

Cargar todos los sólidos obtenidos en el proceso de tamizado en el molino de bolas. Cerrar el molino y poner en operación. Realice la molienda durante 30min.

### **3. Determinación de la distribución del tamaño de partícula del producto**

Asegurarse de sacar todo el contenido del molino (eliminando las bolas con un imán), péselo y realice un nuevo tamizado, con un conjunto de tamices diferente al inicial. Repita el procedimiento descrito en el numeral 1.

**TABLAS DE DATOS**

| <b>DATOS PARA LA MOLIENDA Y EL TAMIZADO</b> |              |                     |              |
|---|--------------|---------------------|--------------|
|   | # de Tamiz   | Peso Vacío<br>(gr)  |              |
|   | 3/8"         |                     |              |
|   | 4            |                     |              |
|   | 8            |                     |              |
|   | 10           |                     |              |
|   | 12           |                     |              |
|   | 14           |                     |              |
|   | 16           |                     |              |
|   | 20           |                     |              |
|   | 25           |                     |              |
|   | 30           |                     |              |
|   | 35           |                     |              |
|   | Fondo        |                     |              |
| <b>ALIMENTO</b>                             |              | <b>PRODUCTO</b>     |              |
| Peso total:                                 |              | Peso total:         |              |
| Tiempo de Tamizado                          |              | Tiempo de tamizado: |              |
| # de Tamiz                                  | Peso<br>(gr) | # de Tamiz          | Peso<br>(gr) |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |
|   |              |                     |              |

**CÁLCULOS**

**A. ANÁLISIS DIFERENCIAL PARA EL ALIMENTO Y EL PRODUCTO.**

El análisis diferencial se efectúa hallando las fracciones másicas retenidas por cada malla. Cada fracción se denomina  $\Delta\phi$ .

$$\Delta\phi_n = \frac{\text{masa retenida sobre el tamiz } n}{\text{masa total de la muestra analizada}}$$

**B. ANALIS ACUMULATIVO PARA EL ALIMENTO Y EL PRODCUCTO.**

El análisis acumulativo se elabora a partir del análisis diferencial sumando acumulativamente los incrementos individuales comenzando con el retenido sobre la malla mas grande. Se tabulan las sumas contra la dimensión de la malla que retuvo la última fracción sumada.

Si  $\phi$  se define como:

$$\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3 + \dots + \Delta\phi_m = \sum \Delta\phi_n$$

$\phi$  es la fracción másica de la muestra cuyas partículas son mayores que  $D_p$ . Para la muestra total el valor de  $f$  es la unidad, y  $D_p$  es la abertura del tamiz  $n$ .

La siguiente tabla muestra un ejemplo del análisis acumulativo y diferencial.

| Tamiz  | Dp (mm) | Masa retenida (g) | Fracción másica retenida (% peso) | Fracción másica acumulada (%peso) |
|--------|---------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 3/8"   | 9,423   | 0                 | 0,00                              | 100,00                            |
| 4      | 4,760   | 0,3704            | 0,38                              | 99,62                             |
| 7      | 2,794   | 15,1409           | 15,37                             | 84,25                             |
| 8      | 2,362   | 54,5124           | 55,35                             | 28,91                             |
| 10     | 2,000   | 9,7700            | 9,92                              | 18,99                             |
| 12     | 1,700   | 14,2536           | 14,47                             | 4,51                              |
| Fondos | 0       | 4,44645           | 4,51                              | 0,00                              |
|        | Total   | 98,4937           | 100,00                            |                                   |

**C. CÁLCULO DEL DIÁMETRO MEDIO SUPERFICIE-VOLUMEN Y EL DIÁMETRO MEDIO ARITMÉTICO PARA EL ALIMENTO Y EL PRODUCTO.**

El diámetro medio superficie-volumen,  $D_{vs}$  se define como:

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{A_w \rho_p}$$

$$A_w = \frac{6\lambda}{\rho_p} \sum \Delta\phi_n / D_n \quad \text{para los gruesos}$$

$$A_w = \frac{6B\lambda}{\rho_p K} (D_{p_1}^K - D_{p_2}^K) \quad \text{para los finos}$$

En donde  $A_w$  es la superficie específica de la partícula,  $D_n$  es el promedio aritmético entre  $D_{pn}$ ,  $D_{p(n-1)}$ ,  $\rho_p$  la densidad de la partícula,  $B$  y  $K$  son dos parámetros que se usan para determinar la superficie específica para los finos, cuyo cálculo se indica mas adelante, y  $\lambda$  es el inverso de la esfericidad de la partícula.

En esta forma se tendrá que para el alimento, compuesto casi totalmente por partículas grandes, el diámetro medio superficie volumen se puede expresar así:

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{A_w \rho_p} = \frac{6\lambda}{\frac{6\lambda}{\rho_p} \rho_p \sum \Delta\phi_n / D_n}$$

$$\bar{D}_{vs} = \frac{1}{\sum \Delta\phi_n / D_n}$$

Para el producto, donde las partículas finas juegan papel importante, el diámetro medio superficie-volumen se calcula teniendo en cuenta la expresión de  $A_w$  para los finos.

$$\bar{D}_{vs} = \frac{6\lambda}{(A_{w(\text{gruesos})} + A_{w(\text{finos})})\rho_p} = \frac{1}{\sum \Delta\phi_n / D_n + (B/K)(D_{p1}^K - D_{p2}^K)}$$

Para encontrar los valores de B y K para los finos se utiliza la ecuación:

$$\Delta\phi_n = B' D_{pn}^{K+1}$$

$$\log \Delta\phi_n = (K+1) \log D_{pn} + \log B'$$

Si se tabulan los valores de  $\Delta\phi_n$  y  $D_{pn}$  y luego se grafican en escala logarítmica, la pendiente de la línea es (K+1). Conocido el valor de (K+1) se leen las ordenadas de cualquier punto sobre la línea y se calcula el valor de B'.

Una vez conocido B' se calcula B a partir de la ecuación:

$$B = \frac{B'(r^{(k+1)} - 1)}{K+1}$$

En donde r es la relación constante entre  $D_{p(n-1)}$  y  $D_{pn}$  para la serie de tamices utilizada.

En la expresión  $A_w$  para los finos  $D_{p1}$  es el diámetro de la partícula más grande de los finos y  $D_{p2}$  el de la más pequeña de los que cayeron al plato.

En este caso se puede considerar como las más grandes aquellas que pasaron la malla 20. Para calcular  $D_{p2}$  se utiliza el siguiente método:

Siendo  $\Delta\phi_p$  la fracción del material que cayó al plato y  $D_{p1}$  el diámetro de la última de las mallas, se tendrá:

$$\Delta\phi_p = \frac{B}{K+1} (D_{p1}^K - D_{p2}^K)$$

De la ecuación se despeja  $D_{p2}$  para utilizarlo en el cálculo de  $\bar{D}_{vs}$ .

El diámetro medio aritmético se expresa de la siguiente forma para el alimento:

$$\bar{D}_N = \frac{\sum (\Delta\phi / D_p^2)}{\sum (\Delta\phi / D_p^3)}$$

Para el producto deben tenerse en cuenta los finos. Por lo que la expresión final es<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Las expresiones utilizadas pueden ser consultadas en la bibliografía citada.

$$\bar{D}_N = \frac{\sum (\Delta\phi / D_p^2) + [B/(1-K)] \left[ (1/D_{p2}^{1-K}) - (1/D_{p1}^{1-K}) \right]}{\sum (\Delta\phi / D_p^3) + [B/(2-K)] \left[ (1/D_{p2}^{2-K}) - (1/D_{p1}^{2-K}) \right]}$$

## **BIBLIOGRAFÍA**

- McCABE W.L y Smith J. C. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Editorial Mc Graw Hill. Cuarta edición. México 1992.
- ROBERT H. PERRY, Manual del Ingeniero Químico. Editorial Mc Graw-Hill. Quinta Edición. México 1992. Volumen 3, sección 8.
- GOODING , N. Manual de Prácticas de operaciones unitarias I. Unidad de publicaciones de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1998.

**TABLA N°1 Tamices disponibles para esta práctica en el laboratorio de Ingeniería Química.**

| # de Tamiz | Diámetro de Poro (mm) |
|------------|-----------------------|
| 3/8"       | 9.423                 |
| 4          | 4.76                  |
| 8          | 2.38                  |
| 10         | 2.00                  |
| 12         | 1.70                  |
| 14         | 1.40                  |
| 16         | 1.19                  |
| 20         | 0.841                 |
| 25         | 0.710                 |
| 30         | 0.600                 |
| 35         | 0.500                 |