

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

**CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE
TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA
ETAPA DE MOLIENDA**

**TESIS
PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE INGENIERIA**

**POR
OSCAR ALBERTO MONGE ORELLANA**

**AL CONFERIRSELE EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

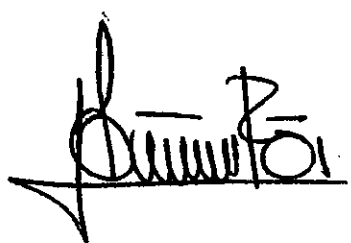
08
T(3849)
c.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE
TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA
ETAPA DE MOLIENDA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química



OSCAR ALBERTO MONGE ORELLANA

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Julio Ismael González Podszueck
VOCAL PRIMERO: Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL SEGUNDO: Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL TERCERO: Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL CUARTO: Br. Fredy Rodríguez Quezada
VOCAL QUINTO: Br. Mario Nephtali Morales Solis
SECRETARIO: Ing. Francisco Javier González López

**TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO**

DECANO: Ing. Jorge Mario Morales G.
EXAMINADOR: Ing. César García
EXAMINADOR: Ing. Estuardo Monroy
EXAMINADOR: Ing. Alfonso Cruz
SECRETARIO: Ing. Edgar José Bravatti Castro

Guatemala, 23 de septiembre de 1,996

Doctor
Adolfo Gramajo
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Presente

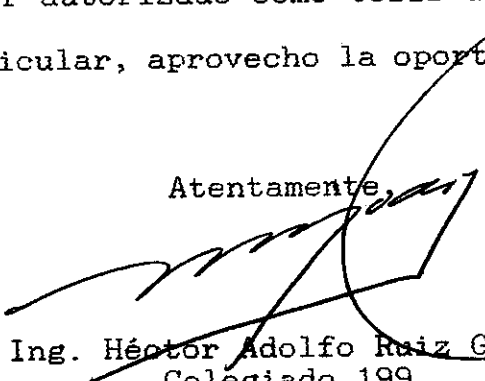
Asunto: Tesis de Graduación del estudiante Oscar
Alberto Monge Orellana, Carnet 84-10851

Estimado Dr. Gramajo:

Deseo referirme al trabajo de investigación asignado al estudiante Oscar Alberto Monge Orellana, Carnet 84-10851, para ser desarrollado como tesis de graduación y para el cual fui nombrado asesor del mismo. Al respecto deseo manifestarle que he revisado su trabajo titulado **CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA ETAPA DE MOLIENDA**, el cual considero llena todos los requisitos para ser autorizado como tesis de graduación.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo,

Atentamente,



Ing. Héctor Adolfo Ruiz Godoy
Colegiado 199



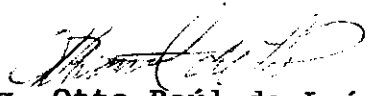
Guatemala, 26 de Septiembre de 1996

Dr. Adolfo Gramajo A.
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Sr. Director, después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del estudiante OSCAR ALBERTO MONGE ORELLANA, de título "CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA ETAPA DE MOLIENDA" .

Una vez revisado este trabajo, lo he encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto, le pido que se proceda con los trámites subsiguientes al efecto.

Muy atentamente,


Ing. Otto Raúl de León de Paz
Revisor del Informe Final de Tesis

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante **Oscar Alberto Monge Orellana**, titulado: **CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA ETAPA DE MOLIENDA**, procede a la autorización del mismo.


Dr. Adolfo Granado
DIRECTOR

ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 23 de octubre de 1,996.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

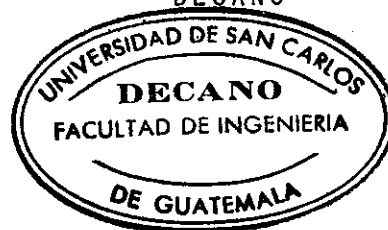
Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **CONTROL DE LA DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE PARTICULA EN LA ETAPA DE MOLIENDA**, del estudiante **Oscar Alberto Monge Orellana**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck
DECANO



Guatemala, 23 de octubre de 1,996.

ACTO QUE DEDICO

A DIOS

Por las bendiciones y sabiduría dadas para alcanzar esta meta, la cual pongo a su servicio.

A MI ESPOSA

Ligia Janeth, por el apoyo prestado en todo momento para la realización de este trabajo.

A MIS PADRES

Oscar Monge Vásquez,
Amilda Fermelicia de Monge como una muestra de amor, respeto y recompensa a todos su esfuerzos.

A MIS HERMANOS

Enio Anteo
Luis Gerardo, por su cariño y amistad.

**A MIS COMPAÑEROS
Y AMIGOS**

Cuya amistad espero conservar por siempre

**A LA UNIVERSIDAD
DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**

Alma Mater, a la cual espero poder aportar los frutos de mi vida.

CONTENIDO

GLOSARIO	i
LISTA DE ILUSTRACIONES	ii
LISTA DE TABLAS	iv
INTRODUCCION	v
CAPITULO 1	
LOS SOLIDOS	1
1.1 Definición de sólido	1
1.1.1 Definición de sólido	1
1.1.2 Definición de sólido	1
1.1.3 Definición de sólido	1
1.2 Caracterización de sólidos	1
1.2.1 Forma o morfología	1
1.2.2 Medición de la forma	2
1.2.3 El tamaño	2
1.2.4 Dureza o friabilidad	3
1.2.5 Densidad real y aparente	3
1.2.6 Lubricidad	4
1.2.7 Higroscopicidad	5
1.2.8 Otras características de los sólidos	5
1.2.8.1 Electrostaticidad	5
1.2.8.2 Termolabilidad	6
1.2.8.3 Corrosividad	6
1.2.8.4 Explosividad	6
1.2.8.5 Flotabilidad	6
CAPITULO 2	
CONSECUENCIAS DEL TAMAÑO DE PARTICULA DE PRODUCTOS SOLIDOS	7
CAPITULO 3	
MOLIENDA DE SOLIDOS	8
3.1 Mecanismo de la reducción de tamaños	9
3.2 Utilización de la energía aplicada	11
eficiencia de molienda	11
3.3 Características del material	11

3.3.1	Propiedades abrasivas	11
3.3.2	Resistencia a la ruptura	11
3.3.3	Friabilidad	12
3.3.4	Estructura	12
3.3.5	Coefficiente de fricción	12
3.3.6	Contenido de humedad	12
3.3.7	Contenido de grasas y aceites	13
3.3.8	Tendencia a la adherencia	13
3.3.9	Inflamabilidad, toxicidad, carácter explosivo	13
3.3.10	Influencia de la temperatura	13
3.3.11	Procesos corrosivos	13

CAPITULO 4

TAMIZADO DE SOLIDOS	14
4.1 Análisis por tamizado	16
4.2 Tamices de prueba	17
4.3 Selección de los tamaños de los tamices	21
4.4 Método de prueba	22
4.5 Presentación de resultados del tamizado	25
4.6 Aplicación del análisis por tamizado	28

CAPITULO 5

SEGREGACION DE SOLIDOS	29
-------------------------------------	----

CAPITULO 6

PARTE EXPERIMENTAL	32
6.1 Instalaciones	32
6.2 Materiales	32
6.3 Equipo	32
6.4 Procedimiento	32
RESULTADOS	34
DISCUSION DE RESULTADOS	39
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS	45
BIBLIOGRAFIA	46

GLOSARIO

Sólido: partícula con forma y tamaño que se mantiene relativamente invariable a menos que alguna acción física o química tome lugar para cambiarla.

Mezclado: acción de juntar substancias o cosas o una substancia o cosa con otra.

Mezcla ideal o perfecta: mezcla en que una muestra removida de la misma tendrá idéntica composición que cualquier otra tomada de la misma mezcla.

Mezcla al azar: mezcla en que la probabilidad de encontrar un componente determinado es la misma en cualquier punto de la misma.

Mezcla ordenada: mezcla que por medio del uso de fuerzas mecánicas, adhesivas o de recubrimiento se obtienen unidades ordenadas en la mezcla, cuya composición es cercanamente idéntica a la de cualquier otro grupo de unidades ordenadas en la mezcla.

Segregación: persistente distribución no homogénea de los componentes de una mezcla de sólidos, debido a diferencias en la distribución de tamaños de partícula y densidad de los ingredientes.

Elutriación: método de clasificación de partículas sólidas por tamaño en el cual un fluido tiende a arrastrar partículas hacia arriba a través de una columna, pero este movimiento recibe la oposición de la gravedad, de manera que sólo las partículas más pequeñas que tienen un tamaño crítico determinado pueden salir.

Plano de clivaje: se denomina así aquel plano de una partícula sólida que permite, que al aplicar cierta concentración de energía que sobrepase un valor mínimo, se produzca la ruptura de la misma en unidades más pequeñas.

LISTA DE ILUSTRACIONES

- Figura 1. Diferentes formas adoptadas por las partículas sólidas.
- Figura 2. Angulo de reposo (θ_{ri}) de un polvo.
- Figura 3. Proceso de ruptura de partículas sólidas.
- Figura 4. Determinación de tamaño de malla.
- Figura 5. Tejidos de tela de alambre.
- Figura 6. Sección transversal de una abertura de micro placa.
- Figura 7. Disposición de los orificios cuadrados y redondos en los tamices de placa perforada.
- Figura 8. Agitador de tamices tipo Ro-Tap.
- Figura 9. Análisis granulométrico. Molienda fina de piedra caliza con molino a martillos.
- Figura 10. Análisis granulométrico. Molienda de piedra caliza con molino a mandíbulas.
- Figura 11. Segregación.
- Figura 12. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad baja.
- Figura 13. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad media.
- Figura 14. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad alta.
- Figura 15. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad baja.

- Figura 16. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad media.
- Figura 17. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad alta.
- Figura 18. Variación de la distribución de tamaños de partícula en función de la velocidad tangencial del dispositivo de ruptura en un molino de martillos.
- Figura 19. Efecto de la velocidad tangencial del dispositivo de ruptura en un molino de martillos sobre el tamaño de las partículas.
- Figura 20. Variación de la distribución de tamaños de partícula en función del tipo de ruptura aplicada (martillos hacia adelante, cuchillas hacia adelante).



LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Algunos métodos de análisis de tamaños de partícula.
- Tabla 2. Tamices de malla de alambre BSS 410
- Tabla 3. Tamizado de una partida de metilmelubrina magnésica.
- Tabla 4. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad baja.
- Tabla 5. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad media.
- Tabla 6. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad alta.
- Tabla 7. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad baja.
- Tabla 8. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad media.
- Tabla 9. Distribución de tamaños de partícula para azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad alta.

INTRODUCCION

La molienda o tamizado de sólidos es una de las operaciones unitarias más antiguas y probablemente una de las más difundidas, ya que la mayoría de las industrias químicas utilizan en una o varias etapas del proceso, la molienda o tamizado de sustancias sólidas como etapa previa para la obtención de productos terminados.

El presente trabajo pretende encontrar una forma sencilla de predecir la distribución de tamaños de partícula de una sustancia procesada en un molino de martillos con el objeto de encontrar condiciones óptimas de operación del molino que nos proporcione un rango de distribución de tamaños de partícula que garantice la minimización de la segregación de partículas en el mezclado de sustancias sólidas en función de tres variables:

- Variación del tipo de ruptura de la partícula (martillos hacia adelante o cuchillas hacia adelante).
- Utilización de diferentes velocidades angulares de los martillos o de las cuchillas.
- Densidad de los materiales involucrados.

El trabajo no probará el comportamiento de los materiales en una mezcla real, sino que mas bien proporcionará el fundamento teórico para predecirlo y ajustar los procedimientos industriales a la hipótesis formulada.

Para tal efecto, el trabajo experimental de la hipótesis planteada, se hace utilizando un molino de martillos, modelo Fitz Mill, marca Fitz Patrick, utilizando azúcar de caña refinada como materia prima para obtener las diferentes distribuciones de tamaño de partícula (granolumetrías). Se analizan las mismas y en base a éstas se determinan condiciones óptimas de operación en la etapa de molienda o tamizado, que garanticen minimizar la segregación de partículas durante el mezclado. Si bien es cierto, se dará un enfoque farmacéutico por la naturaleza del trabajo, los conceptos son aplicables a cualquier caso de molienda o tamizado de sólidos

Es importante mencionar que se utilizarán indistintamente los términos molino o molino de martillos para referirse a un molino de martillos modelo Fitz Mill, marca Fitz Patrick.

CAPITULO 1

LOS SOLIDOS

Para comprender el proceso de molienda y tamizado de sustancias sólidas, es necesario tener nociones básicas sobre la naturaleza de los mismos.

1.1 Definición de sólido

- 1.1.1 Es todo aquel cuerpo que mantiene definidos su forma y su volumen.
- 1.1.2 Es aquel cuerpo que al recibir un esfuerzo no se deforma, sino que se traslada o rota pero sin deformarse.
- 1.1.3 Es un estado físico de la materia, en el cual las partículas vibran pero su posición relativa entre sí no cambia, se mantiene.

1.2 Caracterización de los sólidos

Existen diferentes herramientas que permiten lograr una caracterización completa de las sustancias sólidas, entre las que podemos mencionar:

1.2.1 Forma o morfología

La forma de un sólido es consecuencia de su estructura molecular interna; esto es patente en los cuerpos cristalinos en los que la macropartícula casi siempre se parece a su cristal base. Los amorfos no son así, y en general la forma depende del tipo de proceso que los genera. La forma de las partículas es importante debido a sus efectos en las características de flujo de una masa de partículas. Las partículas sólidas pueden adoptar diferentes formas como aparecen en la figura 1, las cuales se describen a continuación:

Cristaloides:	cubos, paralelepípedos regulares e irregulares
Esferoides:	esferas y ovoides
Fibroides:	rizos, agujas y astillas
Planoides:	escamas y monturas
Mixtos:	todos los demás.

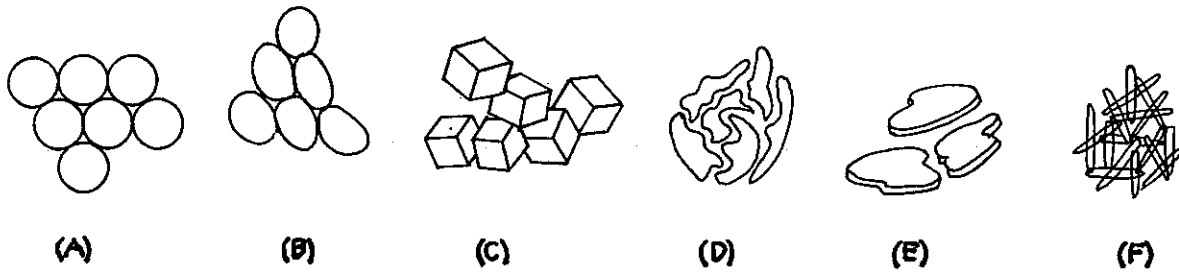


Figura 1. Diferentes formas adoptadas por las partículas sólidas.

- (A) Partículas esféricas
- (B) Partículas oblongas con bordes suaves
- (C) Partículas equidimensionales con bordes agudos
- (D) Partículas irregulares planas
- (E) Partículas irregulares dimensionales
- (F) Partículas fibrosas.

1.2.2 Medición de la forma

Aun cuando la forma no se puede medir, sino sólo describir, se ha tratado de parametrizar con un concepto llamado esfericidad (Φ_s) el cual relacione: el volumen de la partícula (V_p), el diámetro de la partícula (D_p) y la superficie de la misma (S_p), así

$$\Phi_s = 6 V_p / (D_p * S_p) \quad (1)$$

Con dicho parámetro, se pretende similarizar al sólido con una esfera la cual tiene $\Phi_s = 1$. Si Φ_s es menor que 1, la partícula será irregular. La forma de las partículas sólidas es importante debido a sus efectos en las características de flujo de una masa de partículas.

1.2.3 El tamaño

El tamaño del sólido determina o correlaciona con la densidad del mismo, y afecta el tipo de recipiente de almacenaje, con el mecanismo de transporte que se va a usar y con el mecanismo de separación. Sólo se puede hablar de tamaño promedio.

El tamaño de las partículas sólidas es importante, debido a que éste determina las características de movilidad y por ende de segregación de las partículas sólidas. Las partículas más grandes rodarán más lejos que las partículas más pequeñas.

1.2.3.1 Clasificación de tamaños

El tamaño de las partículas sólidas puede clasificarse de la siguiente manera:

Gruesos:	de más de 12 mm
Granos:	de 3 a 12 mm
Finos:	de 150 micrones (mesh No. 100) a 3 mm
Ultrafinos:	de menos de 150 micrones (mesh No. 100).

1.2.4 Dureza o friabilidad

La dureza es resistencia a rayarse, y la friabilidad es tendencia a quebrarse. La mayor dureza incrementa la abrasividad del sólido hacia sus contenedores o transportadores (unido a la forma y tamaño).

En general, los cristaloides duros son más abrasivos; en el otro extremo están los esferoides suaves o friables. Una forma alterna de considerar esta propiedad es medir la abrasividad así: muy abrasivos, medianamente abrasivos y poco abrasivos.

1.2.5 Densidad real y aparente

Todos los sólidos tienen dos densidades: la real y la aparente. La real es la densidad del sólido en sí, intrínseco, sin las cavidades que lo rodean al almacenarse. La densidad aparente toma en cuenta al sólido y a las cavidades que lo rodean al almacenarse, y así depende de la densidad real y del tamaño, forma y del grado de compactación del sólido en el recipiente, pues los sólidos reposados tienden a asentarse más y se compactan; el tiempo de almacenaje también afecta la densidad aparente.

Cuando se habla de sólidos almacenados o transportados, interesa más su densidad aparente (D_{ap})

La densidad aparente no siempre es constante, y varía con el tiempo (el reposo del material); ésta puede calcularse de la siguiente manera:

$$D_{ap} = \frac{((Vol\ sólido) * (D_{real\ sólido}) + (Vol_{aire}) * (D_{aire}))}{Volumen\ Total\ (aire\ y\ sólido)} \quad (2)$$

1.2.6 Lubricidad

La lubricidad es la tendencia a fluir de la partícula sólida individual dentro de la porción de sólido a la que pertenece. Esta es función de su tamaño, forma, electrostaticidad y dureza. Se clasifican:

- Materiales muy móviles
- Materiales móviles
- Materiales de aceptable movilidad
- Materiales cohesivos (poca movilidad)
- Materiales muy cohesivos (casi ninguna movilidad)

En general, la lubricidad se mide en función de otro parámetro conocido como ángulo de reposo interno (θ_{ri}), que corresponde al ángulo respecto a la horizontal que se forma al depositar un pilón del sólido analizado sobre una mesa; se deposita el granillo poco a poco, de manera que los cuerpos se rueden sobre sí, como se observa en la figura 2.

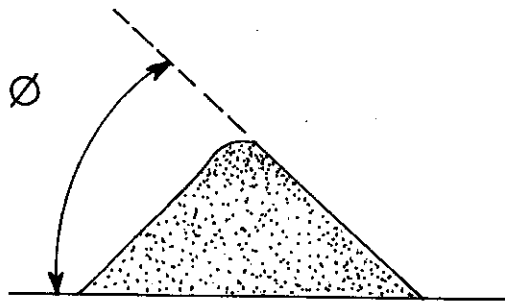


Figura 2. Ángulo de reposo (θ_{ri}) de un polvo.

Con base en este concepto, puede clasificarse la lubricidad de los materiales sólidos de la siguiente manera:

TIPO DE MATERIAL	ANGULO DE REPOSO
Materiales muy móviles	entre 25° y 30°
Materiales móviles	entre 30° y 38°
Materiales de aceptable movilidad	entre 38° y 45°
Materiales cohesivos	entre 45° y 55°
Materiales muy cohesivos	hasta 70°

1.2.7 Higroscopicidad

La higroscopicidad es la tendencia a atrapar humedad del aire y retenerla. Es función de la superficie del sólido y de su electrostaticidad. El ser higroscópico afecta, pues a mayor humedad un sólido tiende a perder su lubricidad (son inversamente proporcional), y esto tiende a dificultar su paso al transportarse. En otro sentido, la humedad puede descomponer al sólido o bien hacer que se funda en grumos gruesos y a veces inmanejables. En general, las sales finas son muy higroscópicas. La humedad puede también generar plagas biológicas o reacciones químicas, y a veces no sólo se atrapa vapor de agua, sino otros gases que pueden dañar el producto.

1.2.8 Otras características de los sólidos

Entre otras características de los sólidos se pueden mencionar las siguientes:

1.2.8.1 Electrostaticidad

Es la capacidad de un sólido de atrapar electricidad estática sobre sí, dejándola acumulada en el recipiente que lo contiene o en el ducto donde fluye por el frotamiento con las paredes o bien, por el frotamiento entre partículas.

1.2.8.2 Termolabilidad

Tendencia a descomponerse con la temperatura al subir ésta como consecuencia de frotamiento o transferencia de calor.

1.2.8.3 Corrosividad

Tendencia al ataque químico.

1.2.8.4 Explosividad

Los sólidos finos y secos son susceptibles a reaccionar fácilmente con el oxígeno del aire, al haber fuego o chispa, así, ambientes con polvos en suspensión de cierta concentración equivalen a gases combustibles, pueden promover explosiones e incendios.

1.2.8.5 Flotabilidad

Es la capacidad de sobreflotar en el aire. Cuanto más fino, más fácil volar en el aire.

CAPITULO 2

CONSECUENCIAS DEL TAMAÑO DE PARTICULA DE PRODUCTOS SOLIDOS

El tamaño y forma de las partículas de un material sólido tienen una importante incidencia en las características tecnológicas y bio-farmacéuticas del producto, tales como: fluidez, homogeneidad y estabilidad física de las mezclas, estabilidad fisico-química, uniformidad de peso y contenido en los comprimidos o polvos terminados, características mecánicas de los comprimidos (dureza, friabilidad ...) y velocidad de disolución de sustancias poco solubles y, previsiblemente, en la bio-disponibilidad de las mismas.

En este caso, se le dará especial atención al problema de homogeneidad de mezclas de sólidos, como consecuencia de la distribución de tamaños de partícula de los sólidos que la componen.

La homogeneidad, en el mezclado de los ingredientes de una determinada formulación, es una característica muy importante que debe controlarse y mantenerse dentro especificaciones predeterminadas para garantizar que el consumidor final obtenga la dosis que corresponda a lo ofrecido, tanto en uniformidad como en potencia del principio activo en cualquier presentación galénica (comprimidos, grageas, granulados, polvos, etc.).

La homogeneidad de la mezcla se obtendrá si la masa de las partículas de cada ingrediente es igual o muy similar.

Si la densidad y la forma de cada ingrediente son diferentes, el manejo de la distribución de tamaños de partícula en la etapa de tamizado o molienda es la mejor forma en que industrialmente se puede obtener partículas de masa igual o muy similar.

Si un sistema de molienda o tamizado proporciona tamaños de partícula dentro de un rango muy amplio, esto significa obtener partículas de tamaño (y masa) muy diferentes para un mismo ingrediente. La molienda de este tipo no garantiza una buena mezcla. No se trata de qué sistema de molienda reduce más el tamaño, sino más bien qué sistema de molienda proporciona un rango determinado y estrecho en cuanto a distribución de tamaños de partícula que nos permita obtener masas iguales o muy similares para cada uno de los ingredientes que componen la mezcla.

CAPITULO 3 MOLIENDA DE SOLIDOS

Cuando se habla de reducción de tamaño de partícula, se está generalizando la operación, cuyo objetivo es hacer que partículas grandes se hagan más pequeñas, no necesariamente por molienda, pues este proceso abarca otras variedades de operaciones físicas.

En la industria farmacéutica, es cada vez más común la necesidad de proceder a una disminución del tamaño en productos sólidos, lo que generalmente se realiza por aplicación de fuerzas mecánicas, en equipos denominados de trituración o molienda. Aquella necesidad puede estar basada en algunas de las siguientes razones:

- a. Aumento de la superficie del sólido, con vistas a facilitar determinados procesos, en razón de la mayor área de intercambio (secado, extracción con solventes, reacciones químicas, etc.)
- b. Modificar u obtener determinadas propiedades que dependen del tamaño de la partícula (poder cubriente, color).
- c. Facilitar el posterior mezclado, ya sea de polvos (formulaciones para comprimir), o polvos y líquidos (suspensiones). La disminución de tamaño supone mejorar la posibilidad de dispersión del sólido, y disminuye su velocidad de sedimentación.
- d. Dar a determinados productos su forma final, uniforme, de más fácil empaque y transporte, y de mejor presentación.

La distinción entre trituración y molienda, dos términos que se confunden y usan indistintamente, reside en el tamaño de la alimentación que ingresa al equipo. Se habla de trituración, reducción grosera de tamaño, cuando se parte de una alimentación cuya dimensión característica exceda de 5 cm, llegándose a casos extremos con valores de 120 a 150 cm, para minerales elaborados de modo directo en la boca de minas o canteras.

La molienda ya toma materiales con dimensiones menores y será media, fina o ultrafina a medida que decrecen dichos valores.

En la industria farmacéutica, es muy difícil encontrarse con un problema de trituración y lo normal es tener que encarar casos de molienda fina y ultrafina.

La reducción de tamaño que puede efectuar un equipo determinado es limitada, por lo que, si aquella reducción es grande, suele ser necesario utilizar varias máquinas que operan en etapas sucesivas, de modo que el producto de una constituya la alimentación de la siguiente.

Por lo general, se busca no sólo disminuir el tamaño de las partículas del sólido, sino obtener un producto que esté contenido dentro de una gama estrecha de tamaños. Ello obliga a utilizar tamizados y clasificación intermedia con reciclo de las fracciones mayores a la exigida y valores mínimos para los excesivamente finos.

3.1 Mecanismo de la reducción de tamaños

Esta operación es una de las más difíciles de analizar. Basta considerar que, generalmente, el material que ingresa al equipo es un producto granular que suele abarcar toda una escala de dimensiones y, en consecuencia, sus propiedades y composición pueden variar de partícula a partícula, sobre todo si se trata de productos naturales.

El pasaje del sólido a través del equipo va a depender de la geometría de éste, de su modo de acción (impacto, compresión, corte, abrasión) y de las características de flujo del material. Ya en la zona de molienda, las fuerzas aplicadas van a actuar sobre la masa total del sólido allí contenido y no sobre las partículas individuales, por lo que se hace difícil, si no imposible, precisar la dirección y magnitud de las fuerzas aplicadas en cada punto. Por otra parte, en dicha zona, el número de partículas varía continuamente, no sólo por el proceso de ruptura del material, sino también por los mecanismos de clasificación de tamaños que el equipo posee (rejillas, corrientes de aire, tamiz). Esto contribuye a complicar la situación, de tal manera que el progreso en la comprensión de esta operación ha sido muy lento y queda mucho aún por aclarar.

Sin embargo, a pesar de la complejidad de la reducción de tamaño, se puede asegurar que la energía necesaria para el mismo dependerá de la estructura interna del material y el mecanismo parece proceder a través de la siguiente secuencia:

Primero, se crean nuevas y pequeñas fracturas que se agregan a las ya presentes en el material; todas ellas se van extendiendo y ramificando según diseños propios de cada material y por último, cuando la concentración de energía sobrepasa cierto valor mínimo, se produce la ruptura de la partícula como se muestra en la figura 3.

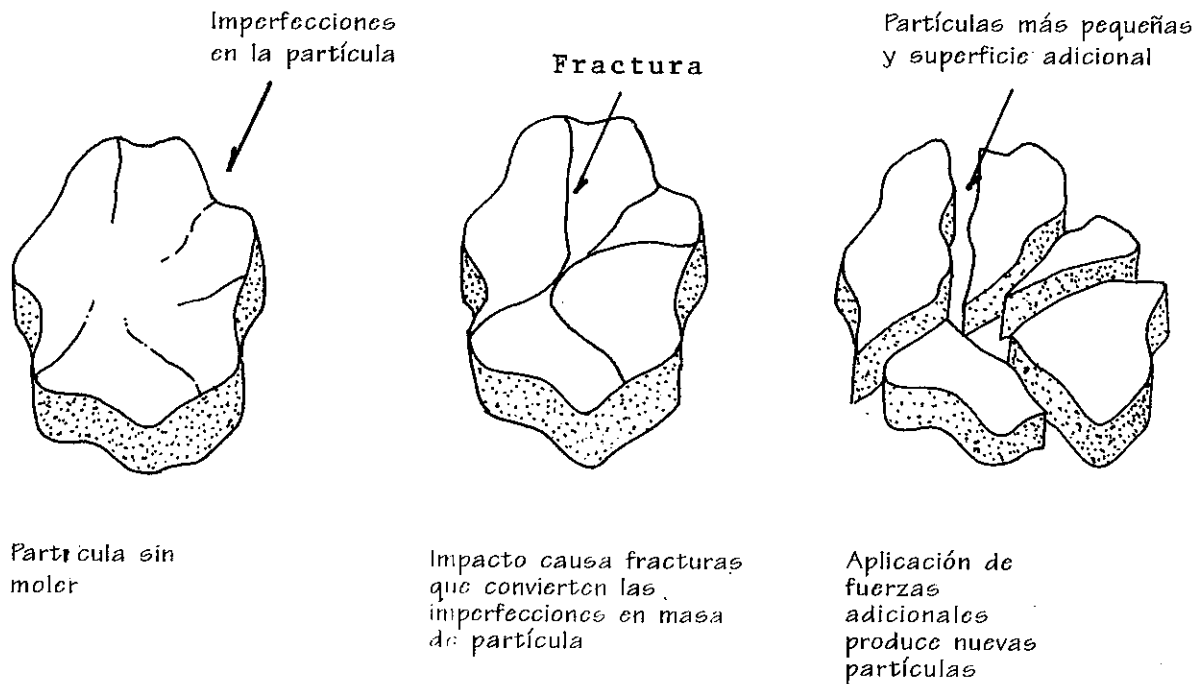


Figura 3. Proceso de ruptura de partículas sólidas.

Esto sucede una y otra vez hasta obtener un tamaño de partícula determinado. No sólo es importante la fuerza aplicada, sino la velocidad de aplicación. Así, una fuerza pequeña podrá provocar la ruptura del material, si se le mantiene un tiempo suficientemente largo.

La experiencia muestra que altas velocidades de aplicación resultan en bajos aprovechamientos de la energía y gran proporción de finos en el producto de la operación.

3.2 Utilización de la energía aplicada-eficiencia de molienda

Como resultado de la fractura producida, se crean nuevas superficies, lo que supone un aumento en el valor de la energía superficial. Esto es particularmente notable para las partículas menores; así, por ejemplo, si una partícula de 1 cm de dimensión es dividida en partículas menores de 1 micrón cada reducción (reducción 10^4), su energía superficial se incrementará en la proporción de 50 millones a uno (5×10^7). Se ha encontrado que efectivamente el aumento de la superficie del sólido es proporcional a la energía aplicada, pero la eficiencia de la operación va a depender mucho del tipo de equipo utilizado, o sea, de la forma y velocidad a que se entregue la energía al sólido.

La mayor parte de esa energía no es utilizada en aumentar superficies en el sólido, sino que aparece como ruido, calor, vibración, y pérdidas por fricción.

Definiendo una eficiencia de molienda como el cociente entre el aumento de energía superficial como resultado de la molienda y la energía recibida por el material, los valores calculados en tales experiencias oscilan entre un 0.1 a un 2%, lo que da idea clara de la pobre utilización de la energía consumida.

3.3 Características del material

Las características del material a procesar afectan en mucho la operación y constituyen una guía insustituible en la elección del equipo a utilizar. Una lista clasificada por orden de importancia es la que sigue:

3.3.1 Propiedades abrasivas

El desgaste del equipo, además de contaminar el producto, es una parte substancial del costo de una molienda. Ese desgaste está en relación directa con la dureza del material a procesar, de allí resulta la importancia de estudiar tal característica que, de ser alta, va a eliminar determinados equipos de entre todos los posibles.

3.3.2 Resistencia a la ruptura

A mayor resistencia, mayor potencia necesaria para una reducción de tamaño.

3.3.3 Friabilidad

La tendencia a la fractura según determinados planos de clivaje, característicos de cada material, varía con la reducción de tamaño. En general, la potencia necesaria aumenta mucho con la disminución de tamaño. La disminución de temperatura favorece la operación.

3.3.4 Estructura

Afecta considerablemente al tipo de equipo que se va utilizar, ya que puede exigir preponderancia de un tipo de acción moliente. Por ejemplo, los materiales fibrosos llevan a equipos con esfuerzos cortantes, en tanto los cristales exigen equipos que actúan por impacto o compresión.

3.3.5 Coeficiente de fricción

Bajos coeficientes de fricción dificultan la molienda, ya que el material se comporta como si estuviera "lubricado", y resiste la aplicación de presiones al deslizarse según determinados planos.

3.3.6 Contenido de humedad

Los materiales granulares fluyen con gran dificultad y tienden a empastarse cuando el contenido de humedad está entre 5 a un 50%. Una molienda en tales condiciones es imposible. Es por eso que en la molienda, cada material debe ser ensayado o probado previamente, ya que no puede predecirse cómo irá cambiando su comportamiento al variar su contenido de agua.

Por ejemplo, el yeso, con un contenido de 1% de agua, no puede molerse fácilmente, en tanto con un 2 a 5%, ya se rompe con extrema facilidad, y da un producto extremadamente fino.

3.3.7 Contenido en grasas y aceites

Ciertos materiales, cacao, nueces, semillas oleaginosas, con un alto contenido en grasas o aceites exigen trabajar a temperaturas muy bajas que transforman el producto en uno altamente friable. De no ser así, el equipo no podrá funcionar por empastamiento.

3.3.8 Tendencia a la adherencia

Algunos materiales presentan una tendencia natural de adherirse y formar conglomerados, en especial en las zonas de estanco del equipo. Como consecuencia, se producen taponamientos y deterioro del material. Se buscará seleccionar equipos con fácil acceso a su interior para la limpieza periódica del mismo.

3.3.9 Inflamabilidad, toxicidad, carácter explosivo

Productos como almidones, azúcares, harinas, etc., son peligrosos por su tendencia combustible. Cuando se deba manipular un agente combustible y un oxidante, es necesario tomar precauciones especiales y ver que en el equipo no se almacenen presiones.

3.3.10 Influencia de la temperatura

Todo proceso de molienda en razón de su baja eficiencia energética, conduce a un apreciable desprendimiento de calor. Este calor, por la robustez de los equipos que dificultan las pérdidas por radiación, aparecerá en el aire que atraviesa el equipo o en el producto molido.

3.3.11 Procesos corrosivos

Muchos materiales pueden dar lugar a corrosiones, a veces por desarrollar efectos electrolíticos con el metal que constituye el molino, con gran deterioro de éste y contaminaciones indeseables. En ocasiones, se recurre al revestimiento de las partes en contacto con el material que se va a moler, con gomas resistentes a tales acciones.

CAPITULO 4 TAMIZADO DE SOLIDOS

La función primaria de la precisión del análisis de partículas es obtener datos cuantitativos acerca del tamaño y distribución del tamaño de las partículas en el material. Sin embargo, el tamaño exacto de una partícula irregular no se puede medir. Los términos longitud, ancho, espesor o diámetro tienen poco significado, porque se pueden determinar muchos valores diferentes para esas cantidades.

El tamaño de una partícula esférica únicamente se define por su diámetro. Para un cubo, la longitud a lo largo de una arista es característica, y para otras formas regulares igualmente existen dimensiones apropiadas.

Para las partículas irregulares, es aconsejable indicar el tamaño de una partícula en términos de una cantidad simple, y la expresión que se usa con más frecuencia es "diámetro equivalente". Este se refiere al diámetro de una esfera que se debe comportar en la misma forma que una partícula cuando se somete a una operación específica.

El diámetro equivalente, que generalmente se asigna, depende del método de medición, por lo tanto, la técnica de clasificación de la partícula debe, siempre que sea posible, duplicar el proceso que uno desea controlar.

Comúnmente se encuentran varios diámetros equivalentes. Por ejemplo, el diámetro de Stokes es medido por técnicas de sedimentación y elutriación; el diámetro del área proyectada se mide microscópicamente, y el diámetro de la abertura del tamiz (tamizado) se mide por el tamizado. Estas últimas medidas se refieren al diámetro de una esfera igual al ancho de la abertura, a través de la cual apenas pasa una partícula. Si las partículas que se prueban no son verdaderas esferas, las que rara vez se encuentran en la práctica, este diámetro equivalente se refiere solamente a su segunda dimensión más grande.

Los datos registrados de cualquier análisis de tamaños deben acompañarse, cuando sea posible, de alguna observación que indique la forma aproximada de las partículas.

Generalmente las descripciones como "granular" o "acicular" son bastante adecuadas para indicar la forma aproximada de las partículas en cuestión.

Algunos de estos términos son los siguientes:

Acicular: forma de aguja.
 Angular: forma puntiaguda o forma burdamente poliédrica.
 Cristalina: forma geométrica libremente desarrollada en un medio fluido.
 Dentrítico: ramificaciones en forma cristalina.
 Fibroso: regular o irregularmente filamentado.
 Escamoso: en formas de hojas o láminas.
 Granular: tiene aproximadamente una misma forma irregular equidimensional.
 Irregular: carece de cualquier simetría.
 Modular: tiene forma redonda irregular.
 Esférica: forma globular.

La tabla 1 muestra una corta lista de algunos de los métodos más comunes de análisis de tamaños, junto con las escalas de tamaño efectivo.

La prueba de tamizado o cribado es el método que más se usa para el análisis de tamaños de partículas. Este cubre una variedad muy amplia de tamaños de partícula; es ésta variedad una de las de mayor importancia industrial. La prueba de tamizado o cribado es tan común como método de análisis de tamaño que las partículas menores de 75 μ m frecuentemente se refiere a que está dentro de la variedad de "subcriba", aunque los métodos modernos de tamizado permiten llevar a cabo la clasificación hasta alrededor de casi 5 μ m.

Tabla 1. Algunos métodos de análisis de tamaño de partícula.

Método	Escala útil aproximada (micras) †
Prueba de tamizado	100,000 - 10
Elutriación	40 - 05
Microscopía (óptica)	50 - 0.25
Sedimentación (gravedad)	40 - 01
Sedimentación (centrífuga)	05 - 0.05
Microscopía electrónica	01 - 0.005

† : Una micra (μ m) equivale a 10^{-6} m

4.1 Análisis por tamizado

El análisis por tamizado o cribas es uno de los métodos más antiguos de análisis de tamaños, y se realiza haciendo pasar un peso de material de muestra conocida sucesivamente a través de una serie de tamices (cribas) cada vez más finas, y pesando la cantidad que se colecta sobre cada tamiz para determinar el porcentaje en peso de cada fracción de tamaño. El tamizado se lleva a cabo con material seco o húmedo y los tamices generalmente se agitan para exponer todas las partículas a las aberturas.

El tamizado, cuando se aplica a partículas formadas irregularmente, se complica por el hecho de que una partícula con un tamaño próximo al de la abertura nominal del tamiz de prueba solamente puede pasar cuando presenta una posición favorable. A medida que inevitablemente ocurre una variación en el tamaño de las aberturas del tamiz, debido a la irregularidad en el tejido, el tamizado prolongado causará aberturas más grandes para ejercer indebidamente, un gran efecto sobre el análisis del tamiz. Al fin de un tiempo dado, cualquier partícula bastante pequeña encuentra su camino a través de uno de los orificios por los que pasa. El procedimiento también se complica en muchos casos por la presencia de partículas de "tamaños próximos" que causan "cegamiento" u obstrucción de las aberturas del tamiz y reducen el área efectiva del medio del tamizado. El cegamiento es más serio en los tamices con un pequeño tamaño de abertura.

El proceso de tamizado se divide en dos etapas:

Primero, la eliminación de partículas considerablemente más pequeñas que las aberturas del tamiz, lo cual debe ocurrir más o menos rápidamente.

Segundo, la separación de las llamadas partículas de "tamaño próximo", el cual es un proceso gradual que raramente alcanza su terminación.

Ambas etapas requieren que el tamiz se manipule de tal forma que todas las partículas tengan oportunidad de pasar a través de las aberturas, de modo que cualquiera que ciegue una abertura se pueda quitar. Idealmente, cada partícula debe quedar por separado en una abertura, como sucede para los tamaños de abertura más grande, pero para la mayor parte de tamaños de partícula, esto no es práctico.

La efectividad de una prueba de tamizado depende de la cantidad de material que se pone sobre el tamiz ("la carga") y del tipo de movimiento que se imparte al tamiz. Básicamente, si la carga es demasiado grande, la capa de material tendrá demasiadas partículas de profundidad para permitir que cada una tenga oportunidad de encontrar una abertura en la posición más favorable para el tamizado en un tiempo razonable. La carga, por lo tanto, está limitada por la necesidad de una cantidad máxima de material retenido al final del tamizado, apropiado al tamaño de la abertura. Por otra parte, la muestra debe contener suficientes partículas para ser representativas de la masa, determinando así su tamaño mínimo de muestra. En algunos casos, la muestra deberá ser subdividida en varias cargas, si se quiere evitar la sobrecarga de los tamices.

4.2 Tamices de prueba

Los tamices de prueba se designan por el tamaño nominal de la abertura, que es la separación central nominal de los lados opuestos de una abertura cuadrada o el diámetro nominal de una abertura redonda. Actualmente se usa una variedad de tamaños de aberturas de tamiz; las más populares:

Norma Alemana, DIN 4188 (German Standard DIN 4188)
Norma ASTM, E11 (ASTM Standard, E11)
Series Americanas de Tyler (The American Tyler Series)
Series Francesas AFNOR (The French Series AFNOR)
y la Norma Inglesa BSS 410 (The British Standard, BSS 410).

Hasta hace poco se designaron los tamices de alambre tejido por número de malla (mesh), y éste se refiere al número de alambres por pulgada, que es lo mismo que el número de aberturas cuadradas por pulgada. Este método se utilizó mucho tiempo y hasta 1962 fue la designación básica en las BSS 410. Tiene la seria desventaja que el mismo número de malla en las varias medidas estándar corresponde a diferentes tamaños de abertura. Actualmente, los tamices se designan por el tamaño de la abertura, que ofrece directamente al operario la información que necesita.

Como muchos trabajadores aún se refieren a los tamaños de tamiz en términos de número de malla, la tabla 2 lista los números de malla para la serie BSS 410 comparada con el tamaño nominal de abertura.

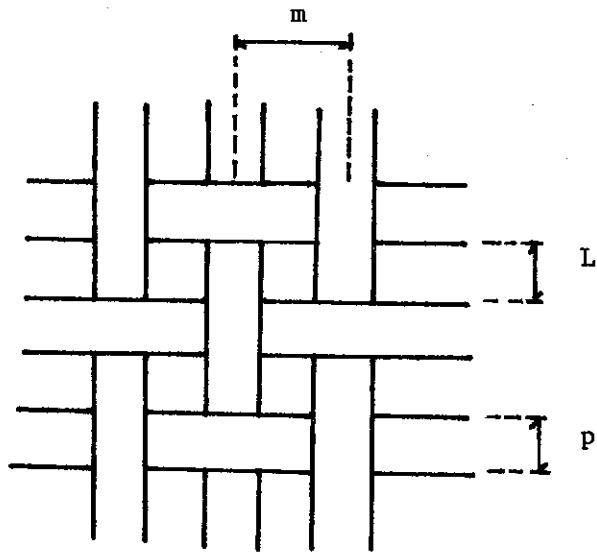
Tabla 2. Tamices de malla de alambre BSS 410.

Número malla	Tamaño abertura nominal(μ m)	Número malla	Tamaño abertura nominal(μ m)
3	5600	36	425
3.5	4750	44	355
4	4000	52	300
5	3350	60	250
6	2800	72	212
7	2360	85	180
8	2000	100	150
10	1700	120	125
12	1400	150	106
14	1180	170	90
16	1000	200	75
18	850	240	63
22	710	300	53
25	600	350	45
30	500	400	38

Los tamices utilizados se construyen de telas tejidas con alambres metálicos, de diámetro y espaciado cuidadosamente especificados, formando el piso de cajas cilíndricas. Tales cajas tienen diámetros que oscilan entre 0.2/0.25 m y una altura de alrededor de 0.07 m.

Sus bordes permiten que los tamices calcen muy bien, y se puedan encimar formando una pila que se cierra por arriba mediante una tapa y por debajo con un plato sólido.

Las aberturas de la malla metálica son cuadradas y el tamaño se determina indicando la longitud del lado cuadrado, para los tamices grandes, o bien el número de aberturas por unidad de longitud (centímetros ó pulgadas), para los tamices más finos, como se muestra en la figura 4.



- L = luz de malla
 d = diámetro del alambre
 m = ancho de malla
 m = $L + d$
 n = número de mallas
 n = $1/m$
 n^2 = $1/m^2$
 K = superficie aberturas / superficie total
 K = característica del tamiz = $L^2 / (L + d)^2$
 K = $L^2 \cdot n^2$ (3)

Figura 4. Determinación de tamaño de malla.

La tela de alambre en los tamices con una abertura nominal de $75 \mu\text{m}$ y las más grandes son de tejido simple, mientras que en las telas con aberturas menores a $63 \mu\text{m}$, los tejidos pueden ser cruzados como aparecen en la figura 5.

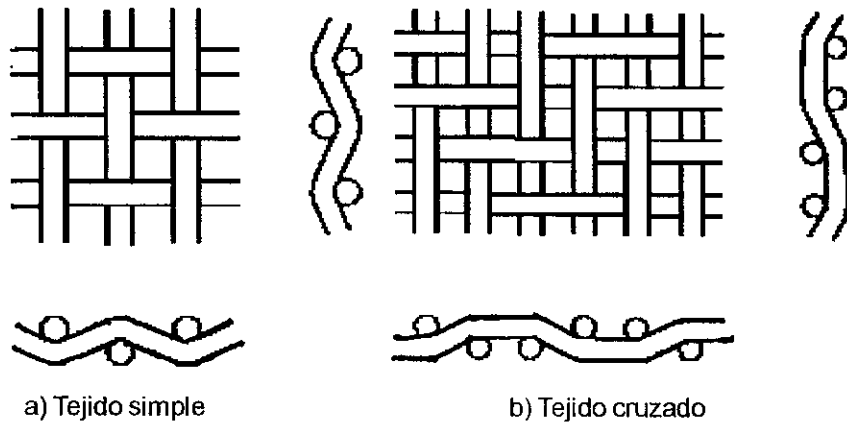


Figura 5. Tejidos de tela de alambre

- (a) Tejido Simple
- (b) Tejido cruzado.

Los tamices estándar de prueba no se pueden conseguir con tamaños de abertura menores a $37 \mu\text{m}$. Los tamices de micromalla se encuentran en el mercado en tamaños de abertura desde $5 \mu\text{m}$ hasta $150 \mu\text{m}$, y están hechos en mallas cuadradas y circulares de níquel electrodepositado. Otro tipo popular es el "tamiz micro-placa", que se fabrica con un electroataque a una placa de níquel. Las aberturas tienen forma de conos truncados con el círculo superior más pequeño como aparecen en la figura 6. Esto reduce el taponamiento, pero también reduce el porcentaje de área abierta, o sea, el porcentaje del área total del medio de tamizado que ocupan las aberturas.

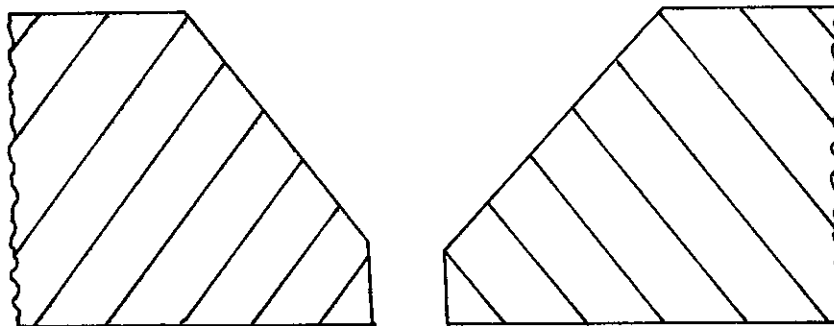


Figura 6. Sección transversal de una abertura de micro placa.

Los microtamices se usan para el tamizado en seco o en húmedo, cuando se necesita un grado de exactitud muy alto en análisis de tamaño de partículas dentro de la gama de tamaño muy fino. Las tolerancias en estos tamices son mucho menores que para los tamices de alambre tejido, la abertura se garantiza hasta dentro de $2 \mu m$ del tamaño nominal.

Para tamaños de abertura alrededor de 1 mm, frecuentemente se usan los tamices de placa perforada, con orificios redondos o cuadrados como el que aparece en la figura 7. Los orificios cuadrados se alinean con los puntos del centro en los vértices de los cuadrados, mientras que los orificios redondos están arreglados con los centros en los vértices de los triángulos equiláteros.

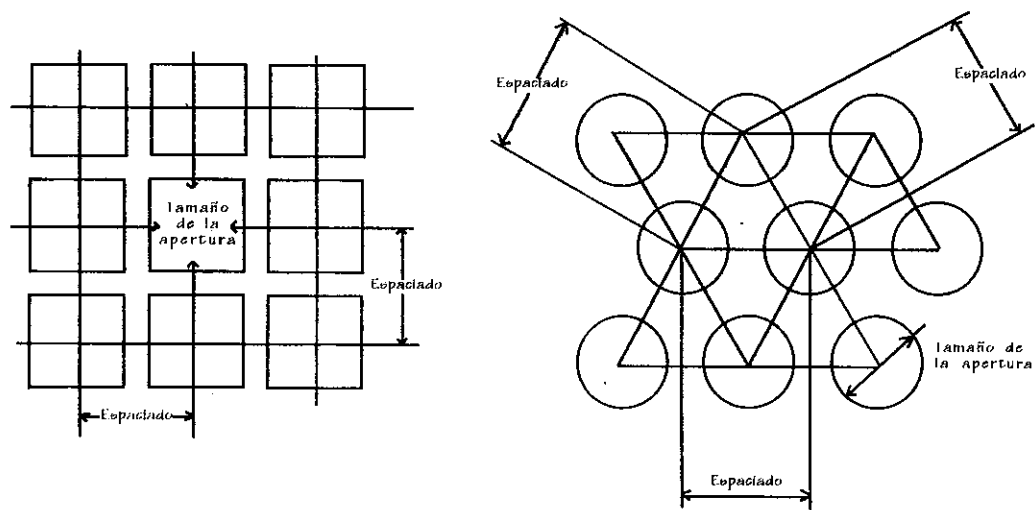


Figura 7. Disposición de los orificios cuadrados y redondos en los tamices de placa perforada.

4.3 Selección de los tamaños de los tamices

En cada una de las series estándar, las aberturas de los tamices consecutivos tienen relación constante unos con otros.

Se ha dicho que una escala útil de tamices es una en que la relación de los anchos de las aberturas de tamices adyacentes es la raíz cuadrada de 2 ($2^{1/2} = 1.414$). La ventaja de tal escala es que las áreas de las aberturas se duplican en cada tamiz, y facilitan la representación gráfica de los resultados.

Las series más modernas de tamices están basadas en una relación de la raíz cuarta de 2 ($2^{1/4} = 1.189$) o bien, basadas en la escala métrica, una raíz décima de 10 ($10^{1/10} = 1.259$), la cual hace posible una clasificación mucho más estrecha de las partículas.

Para la mayor parte de los análisis de tamaño, generalmente no es práctico ni necesario usar todos los tamices de una serie particular. Para la mayoría de los propósitos, los tamices alternados, es decir una serie de $2^{1/2}$, son bastante adecuados, mientras que arriba de cierta escala de tamaño de interés particular, o para trabajo exacto, se pueden usar los tamices consecutivos o sea una serie de $2^{1/4}$. Los tamices intermedios nunca se deben escoger al azar, porque los datos obtenidos serán difíciles de interpretar.

En general, el límite de tamiz se selecciona de manera que no más del 5% de la muestra se retenga sobre el tamiz más grueso, o pase el tamiz más fino. Estos límites, por supuesto, se bajan para un trabajo más exacto.

4.4 Método de prueba

El tamizado a máquina se usa casi universalmente, ya que el tamizado manual es largo y tedioso, y su exactitud depende en gran parte del operador.

Los tamices seleccionados para la prueba se colocan en forma de columna, o nidada, con el tamiz de aberturas más grandes en la parte superior y la más fina en el fondo. Un depósito receptor cerrado se coloca abajo del tamiz del fondo para recibir las partículas finales de menor tamaño, y se coloca una tapadera sobre la parte superior del tamiz más grueso para evitar el escape de la muestra.

El material que se va a ensayar se coloca en el tamiz superior, más burdo, y entonces el juego de tamices se coloca en un sacudidor de tamices que vibra el material en un plano vertical, y, en algunos modelos en un plano horizontal. La duración del tamizado se controla con cronómetro. Durante el sacudimiento, el material de menor tamaño cae a través de los tamices hasta que es retenido sobre uno que tiene aberturas que son ligeramente más pequeñas que el diámetro de las partículas. De esta forma, la muestra se separa en varias fracciones de tamaño.

Después del tiempo necesario, el conjunto de tamices se separa y se pesa la cantidad de material retenido en cada uno de los tamices. La mayor parte de las partículas de malla próxima, que bloquean las aberturas, se pueden quitar invirtiendo el tamiz y golpeando suavemente el armazón. Cuando esto falla, se pasa suavemente una brocha de alambre de bronce suave o de nylon por el lado opuesto de la tela. El cegamiento constituye más de un problema, mientras más fina sea la abertura; el brocheado, aún con una brocha de pelo suave, tiende a distorsionar las mallas individuales de los tamices de aberturas menores a 150 μ m.

El agitador (sacudidor) de tamices Fisher Wheeler tipo Ro-Tap, mostrado en la figura 8, proporciona al grupo de tamices un movimiento horizontal mientras un dispositivo lo golpea en el fondo.

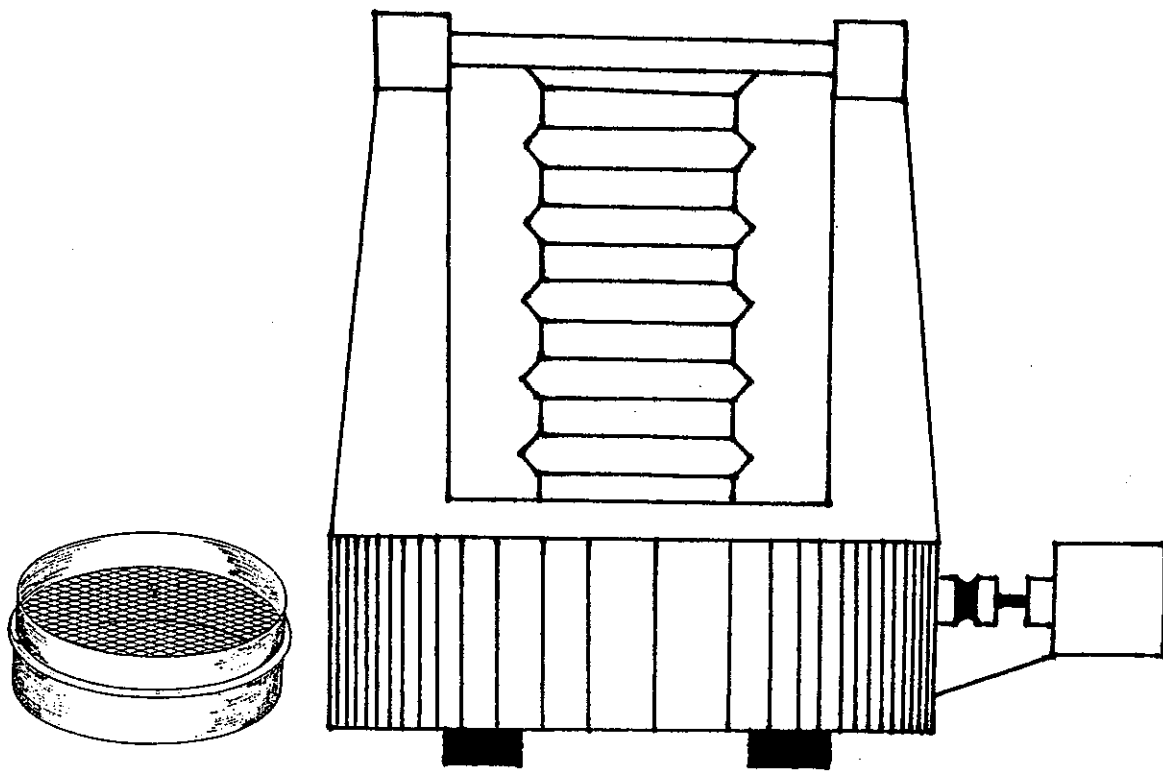


Figura 8. Agitador de tamices tipo Ro-Tap.

Se ha encontrado que este movimiento proporciona la mayor eficiencia, comparado con otros tipos de agitadores, donde

$$\text{Eficiencia} = \frac{\% \text{ de material que realmente pasa}}{\% \text{ de material capaz de pasar}} \quad (4)$$

La agitación se continúa por un tiempo fijo, generalmente 10 a 20 minutos; los tamices se remueven y el material contenido en cada uno de ellos se recolecta y pesa. La eficiencia de los tamices depende del material usado y de su tamaño. La obstrucción de los tamices aumenta, y por consiguiente disminuye la eficiencia, conforme aumenta el tamaño de la muestra y disminuye el tamaño de las partículas.

La obstrucción es también más severa en el caso de sólidos ligeros y pegajosos o en aquellos con una gran concentración de partículas casi idénticas al tamaño de las aberturas del tamiz. Algunos materiales pueden solamente ser analizados satisfactoriamente, suspendiéndolos en un líquido no solvente y pasándolos a través de tamices provistos de dispositivos. Con este método, puede obtenerse un análisis de eficiencia muy alta.

Por otra parte, existe el tamizador de inyección de aire Alpine, el cual también resulta ser un método muy útil para el tamizado de materiales finos. En esta máquina, el aire es succionado hacia arriba, a través del tamiz, desde una abertura giratoria, colocada justo debajo del cedazo y que explora el área total de éste. La dirección del chorro de aire hacia arriba, mantiene limpias las aberturas del tamiz y mantiene la carga de material en estado fluidizado. Al mismo tiempo, se aplica una presión negativa en el fondo del tamiz, la cual remueve las partículas finas hasta un aparato colector. Las partículas de mayor tamaño, retenidas sobre el tamiz, se pesan al final de la separación. Esta limpieza de flujo inverso de las mallas es muy efectiva en la reducción del segamiento u obstrucción de las aberturas del tamiz.

Con algunos polvos, el tamizado por esta técnica es posible hasta tamaños de 10 μ m, y los análisis de tamaño se realizan quitando las partículas del extremo fino de la distribución de tamaños, y usando consecutivamente tamices simples.

El tamizado en húmedo se puede usar sobre material, ya en forma de lodo, o puede ser necesario para polvos que forman agregados cuando se tamizan en seco.

El agua es el líquido que se usa con más frecuencia en el tamizado en húmedo, aunque para los materiales repelentes al agua, tales como el carbón o menas sulfuradas, se necesita un agente humectante.

La muestra de prueba se puede lavar a través de un juego de tamices, con el tamiz más fino al fondo. Al terminar la prueba de tamices, junto con el material retenido de tamaño más grande, se secan a una temperatura baja y apropiada, y se pesan.

El tamizado automático en húmedo se efectúa llenando un juego de tamices con el líquido, y se alimenta la muestra por la parte superior. El tamizado se realiza por lavado, vibración, acción recíproca, vacío, ultrasonido o una combinación.

4.5 Presentación de los resultados del tamizado

Los resultados del análisis granulométrico de una muestra sólida por tamizado suelen presentarse en un cuadro en el que se indican para cada fracción, denominación de acuerdo con el juego de tamices utilizado, diámetro medio asignado a las partículas de cada fracción, fracciones en peso de la muestra original que pasaron y que se retuvieron para cada tamiz (ver tabla 3), tomando en este caso como ejemplo el tamizado de una partida de metilmelubrina magnésica.

Tabla 3. Tamizado de una partida de metilmelubrina magnésica.

A Malla	B D_n	C x_i	D Σx_i	E D_t	F $1-\Sigma x_i$
10/14	0.1400	0.025	0.025	0.1168	0.975
14/20	0.1001	0.295	0.320	0.0833	0.680
20/28	0.0711	0.239	0.559	0.0589	0.441
28/35	0.0503	0.166	0.725	0.0417	0.275
35/48	0.0356	0.108	0.833	0.0295	0.167
48/65	0.0252	0.071	0.904	0.0208	0.095
65/100	0.0178	0.043	0.947	0.0147	0.053
100/150	0.0126	0.033	0.980	0.0104	0.020
150/200	0.0089	0.020	1.000	0.0074	0.000

- A = Tamices serie Tyler
 B = Diámetro medio de tamices en cm.
 C = Fracción en peso retenida en cada tamiz g/g.
 D = Total acumulado de retenidos hasta cada tamiz g/g.
 E = Diámetro del tamiz en cm.
 F = Total que pasó hasta cada tamiz g/g.

Para visualizar la distribución de tamaños en la muestra original, los valores obtenidos se grafican y con tal objeto se han propuesto varios tipos de representación gráfica.

Los gráficos de tipo " acumulativo " representan en escalas uniformes el porcentaje acumulado de material versus la dimensión o diámetro medio asignado a las partículas. Por consiguiente, éstos no dependen del juego de tamices utilizado.

A partir de estos diagramas, por diferenciación gráfica, se pueden obtener los diagramas " no acumulativos " o diferenciales, en donde aparece el porcentaje de material mayor que determinado tamaño (retenido) o menor que determinado tamaño (que pasó), versus la dimensión media asignada a dicha fracción, tal como se muestra en la figura 9.

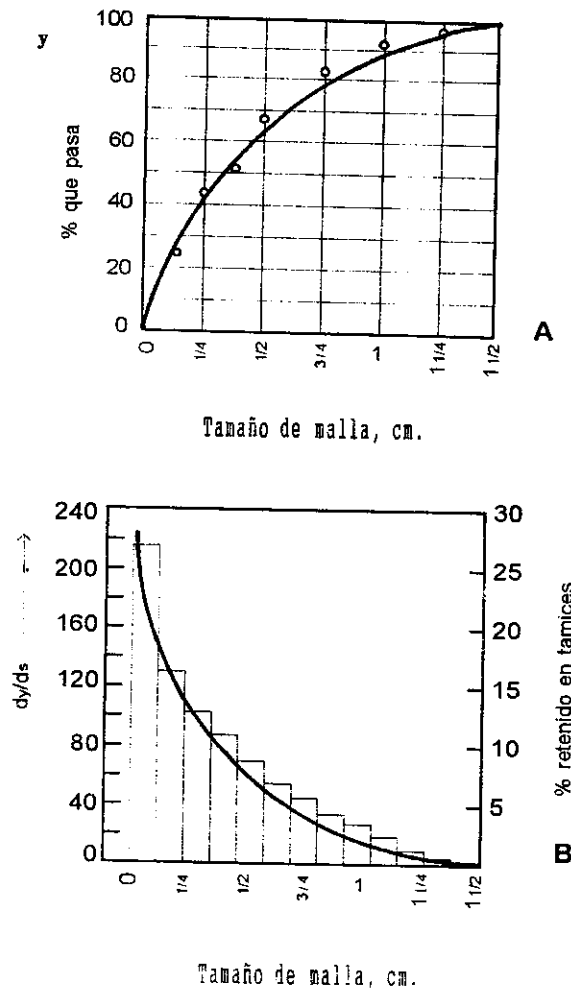


Figura 9. Análisis granulométrico. Molienda fina de piedra caliza con molino a martillos, 1000 rpm.

- (A) curva acumulativa
- (B) curva no acumulativa.

Estos diagramas presentan formas características para los productos de determinados equipos, como es de esperar en razón de su distinta acción. Así, en aquellos equipos que realizan una clasificación de tamaños (piso cribado, abertura entre rodillos o mandíbulas, corrientes de aire), aparece un segundo máximo, y la curva obtenida es en realidad la suma de dos, como se señala con la línea punteada en el ejemplo de un molino a mandíbulas de la figura 10. La parte de los finos muestra una distribución de tipo hiperbólico, indicando que ellos pasaron a través del equipo sin haber sido clasificados, en tanto la fracción de los gruesos sufrió un proceso discriminatorio que lleva una curva de tipo gaussiano con evidente preponderancia de cierto intervalo (pico) y disminución hacia ambos extremos. Esta curva es típica de los equipos a mandíbulas, conos giratorios y molinos de discos.

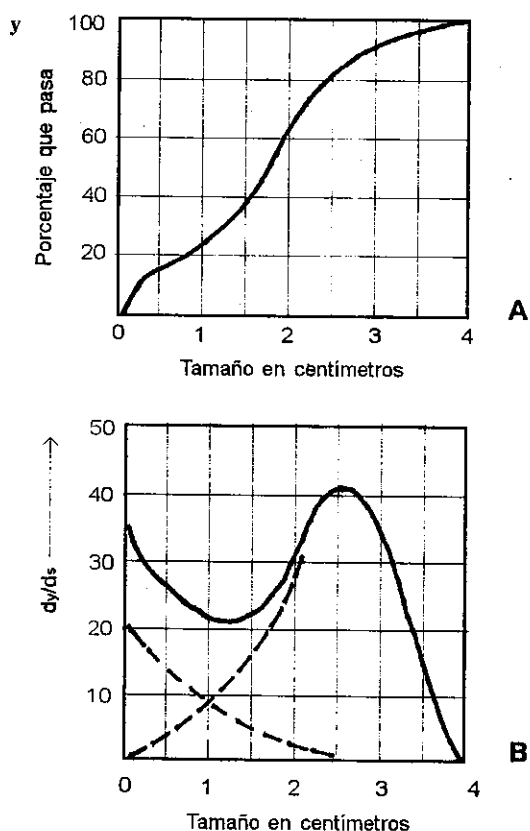


Figura 10. Análisis granulométrico de piedra caliza en molino a mandíbulas.

- (A) Curva acumulativa
 (B) Curva no acumulativa.

Tanto los gráficos acumulativos como los diferenciales, pueden ser presentados en escalas semilogarítmicas. Los trazos correspondientes a casi el 80% del material, en ambas curvas, son rectas con ecuaciones de tipo

$$w_t^* = A \cdot D_t^n \text{ curva a} \quad (5)$$

$$w = K \cdot D_t^n \text{ curva b} \quad (6)$$

Siendo **A** y **n** constantes independientes del juego de tamices utilizados.

K = **A (rⁿ-1)**, constante que depende del juego de tamices utilizado;

r = característica de la serie de tamices utilizados; para la serie Tyler = 2^{1/2};

w_t^{*} = porcentaje de material acumulado, retenido;

w = peso o fracción en peso de material retenido;

D_t = tamaño de apertura que retuvo la fracción en cuestión;

n = constante que depende del material procesado, del equipo utilizado y de condiciones de la operación.

4.6 Aplicación del análisis por tamizado

Con los datos suministrados por el tamizado de nuestra muestra, se puede obtener información adicional acerca de la misma. Así es posible adjudicar al sólido diversas dimensiones medias, de acuerdo a la aplicación ulterior de ellas, o bien, calcular la superficie específica o el área total de las partículas, e inclusive llegar a un valor aceptable para el número total de partículas.

CAPITULO 5 SEGREGACION DE SOLIDOS

La segregación en una mezcla de sólidos se observa cuando existe una persistente distribución no uniforme de los componentes de la mezcla, debido a diferencias en tamaños y densidades de las partículas que la componen. Diferencias en la forma y "rugosidad" de las partículas también son importantes para determinar la segregación en una mezcla de sólidos.

Así como las partículas más pequeñas tienden a suspenderse en los fluidos (aireación) con más facilidad que las grandes, y da lugar a la formación de humos; lo contrario ocurre en el rodamiento y las partículas grandes van a rodar más lejos que las pequeñas. Agitadas en un recipiente van a acumularse en el fondo del mismo por debajo de las pequeñas, como en la figura 11.

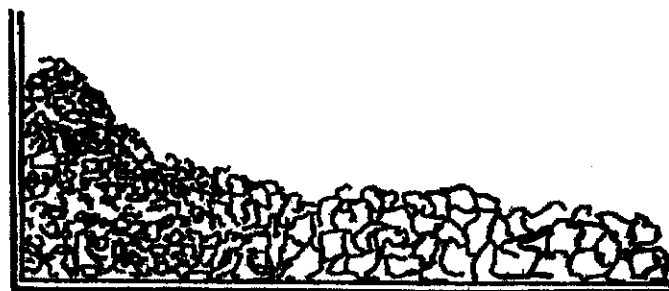


Figura 11. Segregación. Las partículas grandes tienden a depositarse en el fondo de los recipientes al ser agitadas. Al rodar van a recorrer una mayor distancia.

El comportamiento de las partículas sólidas ante situaciones de flujo, o sea, su grado de similitud con los fluidos, depende de un conjunto de propiedades que ya hemos analizado en el capítulo 1. Esas propiedades, al influir sobre condiciones de flujo de los materiales que se van a mezclar, van a tener incidencia en la mayor o menor tendencia a la segregación dentro de los equipos de mezclado.

Cuanto más fácilmente fluya un material, mayor probabilidad existe de que pueda segregarse.

En aquellos casos en que se noten efectos segregativos que dificulten la operación de mezclado, se deberá revisar cuál de las propiedades de las partículas puede ser la causante. Convendrá así estudiar principalmente el tamaño, densidad, distribución de tamaños, la forma, rugosidad, adherencia, los efectos superficiales y en especial la acumulación de cargas electrostáticas. Por ejemplo, el tamaño y la densidad de las partículas tienen efectos contrarios que pueden balancearse adecuadamente, de modo que las partículas más pequeñas sean las más pesadas (las de mayor densidad).

La mejor indicación acerca de las condiciones de movilidad (tendencia a fluir) de las partículas puede obtenerse a través de medidas del ángulo de reposo del material, ampliamente descrito en el capítulo 1.

Las partículas muy finas son cohesivas en razón de la gran influencia de las fuerzas superficiales y su predominio sobre las gravitatorias. Por ello, una regla práctica ante un problema de segregación por gran movilidad es probar reducir el tamaño de los materiales que se van mezclar.

La acumulación de cargas electrostáticas en la superficie de las partículas es una de las causas más comunes y molestas de mezclado defectuoso. En ocasiones, el trato del material dentro del mezclador es responsable de la aparición de dichas cargas. La experiencia muestra que bastan pocas cargas para provocar consecuencias importantes y llevar los tiempos de mezclado a valores muy altos. Por otra parte, también es común que una vez provocada la acumulación de cargas, la situación no mejore con el tiempo, y por el contrario empeore.

Por ello, es regla no extender más allá de lo estrictamente necesario la operación de mezclado, ya que ningún beneficio se va a obtener, y sí pueden originarse procesos que retrograden la mezcla, y anulen lo conseguido hasta ese momento. La solución a un problema de segregación por cargas electrostáticas puede provenir de una revisión de la historia previa del material para ubicar el instante en que se somete al material a un tratamiento incorrecto.

Así, por ejemplo, puede encontrarse que es conveniente reemplazar una etapa de molienda por vía seca por otra en régimen húmedo, que impide la aparición de cargas en el material.

CAPITULO 6

PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo principal de la parte experimental es determinar las diferentes distribuciones de tamaño de partícula (granulometrías), que se obtienen en un molino de martillos. Para ello, se utilizará el modelo Fitz Mill de marca Fitz Patrick trabajando con diversos tipos de rupturas a través de su uso con martillos y cuchillas hacia adelante a diferentes velocidades.

6.1 Instalaciones

El trabajo experimental se desarrollará en la planta farmacéutica de los laboratorios Lancasco, en sus áreas de fabricación de productos farmacéuticos, y en el laboratorio de garantía de calidad.

6.2 Materiales

Como material para poder llevar a cabo las pruebas experimentales, se utilizará azúcar de caña refinada.

6.3 Equipo

Balanza de piso 0-300 Kg
Balanza grado analítico
Molino de martillos, marca Fitz Patrick, modelo Fitz Mill, 10 HP
Medidor de tamaño de partícula de sólidos, tipo Ro-Tap, marca Sieve Shaker
Juego de Tamices con tamaños de orificio en el rango mesh 30 - 200
Cristalería

6.4 Procedimiento

6.4.1 Fijar en el molino de martillos la velocidad y el tipo de ruptura (martillos hacia adelante o cuchillas hacia adelante), para realizar la prueba, y utilizar un tamaño constante de tamiz.

- 6.4.2 Hacer funcionar el molino de martillos y alimentar uniformemente el azúcar hasta hacer pasar todo el material a través del mismo.
- 6.4.3 Tomar una muestra del producto molido de 0.125 Kg.
- 6.4.4 Determinar el peso de cada uno de los tamices que se va a utilizar durante el experimento.
- 6.4.5 Colocar la muestra de producto molido en el tamiz superior del medidor de tamaños de partícula, y se hace funcionar durante 20 minutos o bien, hasta que no se registre variación en el peso de cada tamiz.
- 6.4.6 Determinar la cantidad de material retenida en cada uno de los tamices por diferencias entre el peso original del tamiz, y el peso del tamiz con el material retenido.
- 6.4.7 Determinar la distribución de tamaños de partícula obtenida para esta muestra.
- 6.4.8 Elaborar el diagrama que represente la distribución de tamaño de partícula obtenida para esta muestra, graficando la fracción en peso de material *versus* el número de tamiz.
- 6.4.9 Repetir inciso 6.4.1 a una velocidad diferente.

RESULTADOS

Los resultados del análisis de las muestras de azúcar de caña refinada, utilizadas para llevar a cabo el experimento a diferentes velocidades y diferentes orientaciones de ruptura (martillos hacia adelante ó cuchillas hacia adelante), aparecen en las figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17 y en las tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 a continuación.

FIGURA No 12. Cuchillas hacia adelante, velocidad baja

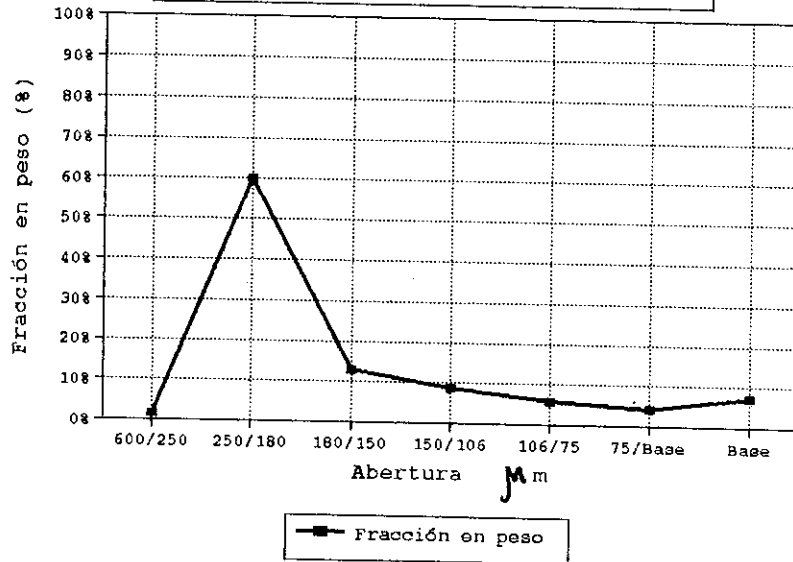


FIGURA No 13. Cuchillas hacia adelante, velocidad media

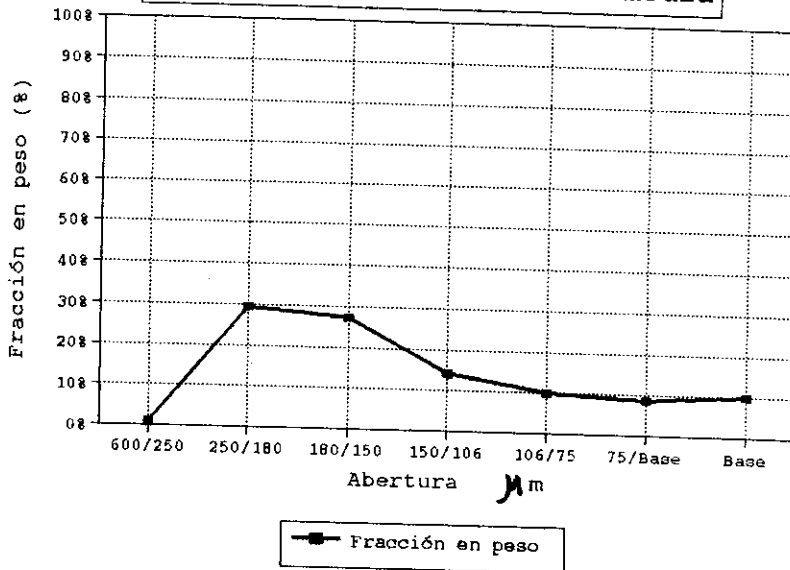


FIGURA No 14. Cuchillas hacia adelante, velocidad alta.

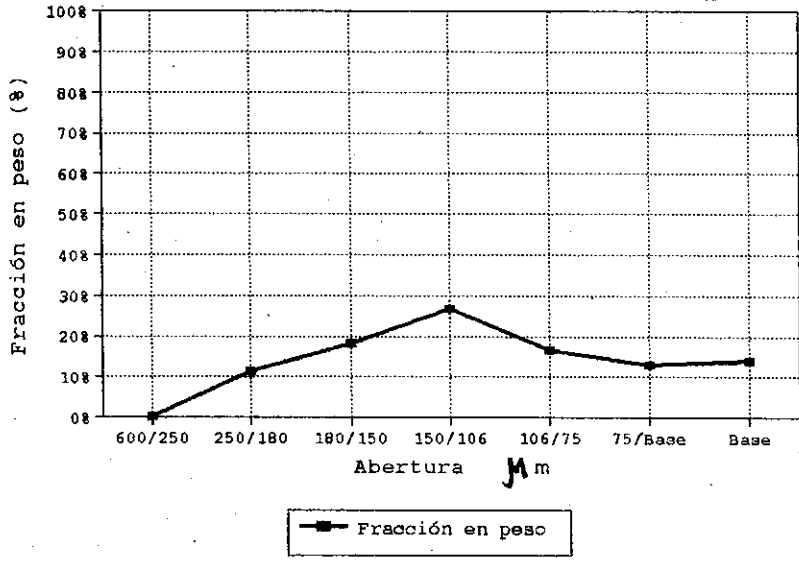


FIGURA No 15. Martillos hacia adelante, velocidad baja.

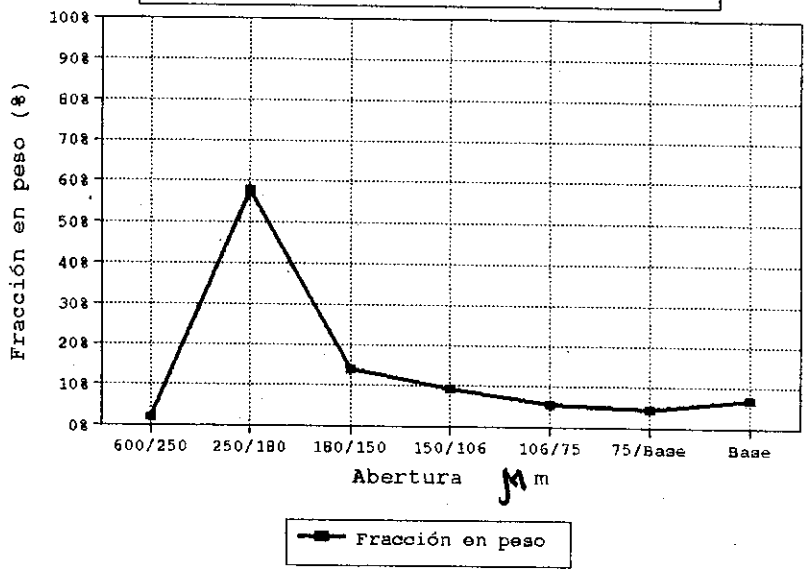


FIGURA No 16. Martillos hacia adelante, velocidad media.

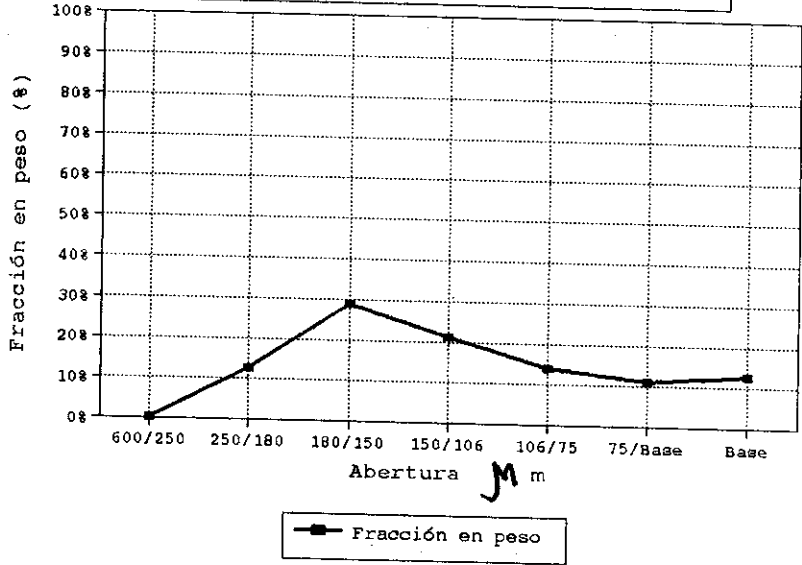
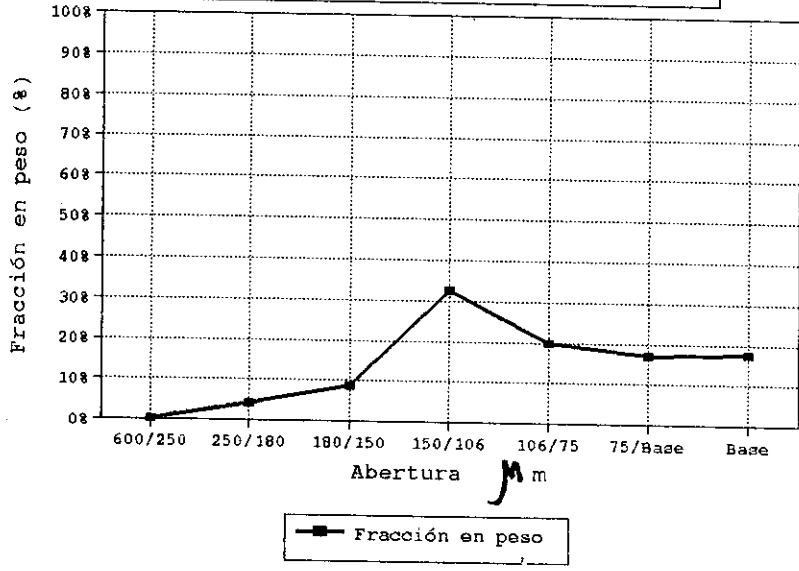


FIGURA No 17. Martillos hacia adelante, velocidad alta.



PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
BIBLIOTECA

Tabla No. 4 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad baja.

No. Mesh	Abertura μ m	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.04	400.11	2.07	1.66%
60/80	250/180	349.05	423.81	74.76	59.81%
80/100	180/150	365.10	381.39	16.29	13.03%
100/140	150/106	339.14	349.80	10.66	8.53%
140/200	106/75	332.38	339.66	7.28	5.82%
200/Base	75/Base	327.34	332.39	5.05	4.04%
Base	Base	370.47	379.36	8.89	7.11%
Total				125.00	100.00%

Tabla No. 5 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad media.

No. Mesh	Abertura μ m	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.06	399.19	1.13	0.90%
60/80	250/180	349.09	385.51	36.42	29.14%
80/100	180/150	365.10	399.11	34.01	27.21%
100/140	150/106	339.15	356.81	17.66	14.13%
140/200	106/75	332.38	344.79	12.41	9.93%
200/Base	75/Base	327.38	338.27	10.89	8.71%
Base	Base	370.47	382.95	12.48	9.98%
Total				125.00	100.00%

Tabla No. 6 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con cuchillas hacia adelante a velocidad alta.

No. Mesh	Abertura μ m	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.04	398.14	0.10	0.08%
60/80	250/180	349.05	363.33	14.28	11.42%
80/100	180/150	365.09	388.13	23.04	18.43%
100/140	150/106	339.18	372.24	33.06	26.45%
140/200	106/75	332.20	352.98	20.78	16.62%
200/Base	75/Base	327.37	343.65	16.28	13.02%
Base	Base	370.47	387.93	17.46	13.97%
Total				125.00	100.00%

Tabla No. 7 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad baja.

No. Mesh	Abertura μm	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.04	400.63	2.59	2.07%
60/80	250/180	349.06	421.52	72.46	57.97%
80/100	180/150	365.10	382.41	17.31	13.85%
100/140	150/106	339.15	350.81	11.66	9.33%
140/200	106/75	332.38	339.30	6.92	5.54%
200/Base	75/Base	327.38	332.85	5.47	4.38%
Base	Base	370.48	379.07	8.59	6.87%
Total				125.00	100.00%

Tabla No. 8 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad media.

No. Mesh	Abertura μm	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.05	398.10	0.05	0.04%
60/80	250/180	349.07	364.75	15.68	12.54%
80/100	180/150	365.10	401.11	36.01	28.81%
100/140	150/106	339.19	365.31	26.12	20.90%
140/200	106/75	332.40	349.66	17.26	13.81%
200/Base	75/Base	327.38	341.26	13.88	11.10%
Base	Base	370.47	386.47	16.00	12.80%
Total				125.00	100.00%

Tabla No. 9 Distribución de tamaños de partícula de azúcar de caña refinada en un molino de martillos marca Fitz Patrick, que trabaja con martillos hacia adelante a velocidad alta.

No. Mesh	Abertura μm	Peso inicial (PI) g	Peso final (PF) g	Peso neto (PF-PI) g	% en peso
30/60	600/250	398.03	398.39	0.36	0.29%
60/80	250/180	349.07	354.29	5.22	4.18%
80/100	180/150	365.12	376.19	11.07	8.86%
100/140	150/106	339.19	379.79	40.60	32.48%
140/200	106/75	332.40	357.40	25.00	20.00%
200/Base	75/Base	327.38	348.24	20.86	16.69%
Base	Base	370.46	392.35	21.89	17.51%
Total				125.00	100.00%

DISCUSION DE RESULTADOS

Un análisis de los resultados obtenidos, a través de las gráficas de distribución de tamaños de partícula, permite observar lo siguiente:

- a. La distribución de tamaños de partícula al variar la velocidad de rotación de los martillos o de las cuchillas en el molino de martillos utilizado, sufre un notable cambio haciendo que el producto obtenido sea más fino, a medida que se aumenta la velocidad.
- b. La distribución de tamaños de partícula obtenido al variar el tipo de ruptura (martillos hacia adelante ó cuchillas hacia adelante) en el molino de martillos, sufre un cambio moderado, que hace que el producto obtenido sea más fino cuando se trabaja con martillos hacia adelante para una velocidad fija.
- c. El rango de distribución de tamaños de partículas del producto resultante de la molienda se hace más estrecho a medida que se disminuye la velocidad de operación del equipo para ambos tipos de ruptura (martillos hacia adelante, cuchillas hacia adelante).

Según estudios realizados por The Fitz Patrick Company¹ en sus laboratorios, en relación a la reducción de tamaños de partícula en un molino de martillos, modelo Fitz Mill, la distribución de tamaños de partícula en el producto resultante de la operación de molienda se hace más fina a medida que se aumenta la velocidad de operación del equipo.

Esto se debe a que a velocidades más altas, el ángulo de acercamiento de una partícula individual a uno de los agujeros del tamiz en el molino de martillos tiende a acercarse a la tangente como en la figura 18, y hace que un agujero redondo en el tamiz parezca un agujero elíptico que hace que se obtenga como resultado una partícula menor para una misma abertura de tamiz.

¹ Referencia #1, página #6

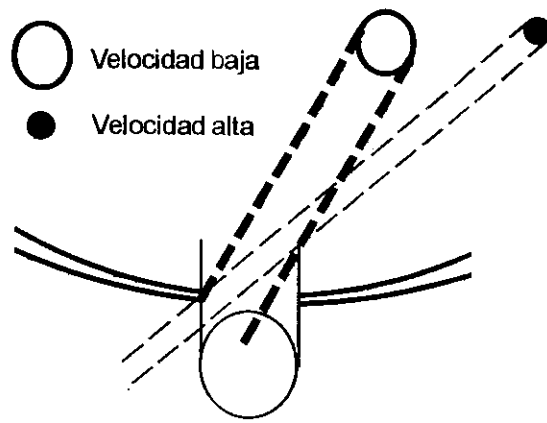


Figura 18. Variación de la distribución de tamaños de partícula en función de la velocidad tangencial del molino.

Por su parte, Herbert A. Lieberman² hace referencia también a este respecto, haciendo ver el efecto de la velocidad en la distribución de tamaños de partícula en el producto resultante de la operación de molienda, e indica que se obtendrán productos más finos a medida que la velocidad de operación aumenta, debido a que las partículas estarán pasando tangencialmente a través de las aberturas del tamiz del molino como se muestra en la figura 19.

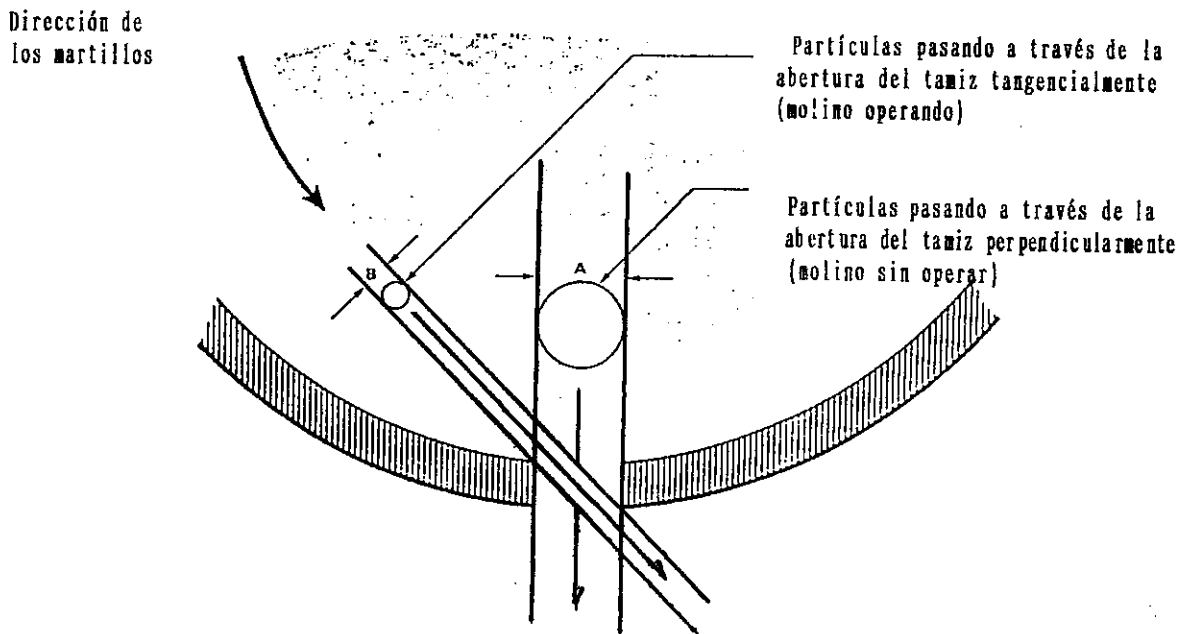


Figura 19. Efecto de la velocidad tangencial en un molino a martillos sobre el tamaño de las partículas.

²

Referencia #2, página #100.

Al trabajar con martillos hacia adelante, en un molino de martillos Fitz Patrick, se obtienen partículas más finas para una velocidad fija; esto es debido a que con los martillos hacia adelante, el área de contacto entre el dispositivo de ruptura (martillos) y el material es mayor³ como se muestra en la figura 20.

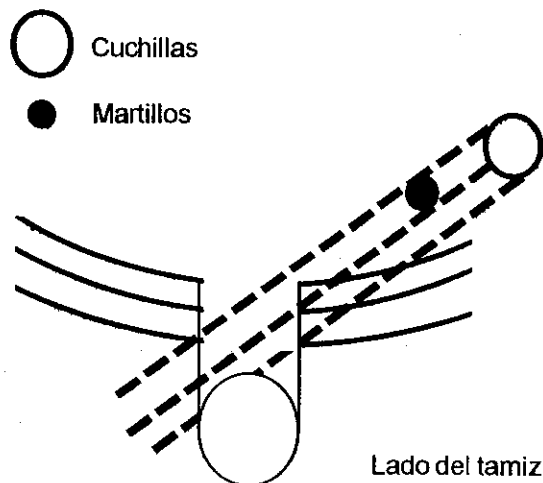


Figura 20. Variación de la distribución de tamaños de partícula en función del tipo de ruptura aplicado sobre las partículas sólidas (martillos o cuchillas hacia adelante).

De igual manera, con el molino trabajando con las cuchillas hacia adelante, el área de contacto entre el dispositivo ruptura (cuchillas) y el material es menor⁴, que da como resultado partículas menos finas para la misma velocidad.

³ Referencia #1, página #6
⁴ Referencia #1, página #6

Al observar las gráficas de distribución de tamaños de partícula del material que pasó a través del molino de martillos, se puede ver que a velocidades bajas, independientemente del tipo de ruptura utilizado (martillos hacia adelante o cuchillas hacia adelante), el rango de distribución de tamaños de partícula se hace más estrecho, lo que da como resultado que un alto porcentaje de la muestra (alrededor del 60%) tenga un mismo tamaño de partícula.

Este comportamiento es normal⁵, si consideramos que a velocidades bajas, la fuerza que se ejerce sobre el material para que pase a través del tamiz o emparrillado del molino de martillos es mínima, que hace que gran parte del material pase fácilmente a través de este tamiz sin que sufra una grosera reducción de tamaño de partícula.

5

Referencia #1, página #6

CONCLUSIONES

1. La distribución de tamaños de partícula obtenidos en un molino de martillos marca Fitz Patrick, puede ser controlada por medio de variaciones en el tipo de ruptura (martillos hacia adelante o cuchillas hacia adelante), que se aplica sobre el sólido que se va a tratar.
2. La distribución de tamaños de partícula, obtenidos en un molino de martillos marca Fitz Patrick, puede ser controlada por medio de variaciones en la velocidad de operación del equipo.
3. La segregación de partículas en el mezclado de sólidos puede ser minimizada por medio del control de las condiciones de operación (velocidad, tipo de ruptura) del equipo de molienda, que permita una adecuada distribución de tamaños de partícula en el producto resultante; en este caso, lograda al trabajarlo con cuchillas hacia adelante a velocidad baja.

RECOMENDACIONES

1. Dado que la densidad y la forma de las partículas sólidas son características que difícilmente pueden variarse, se recomienda el control del tamaño de las mismas como una garantía de poder obtener partículas de masas iguales o muy similares, que minimicen la segregación en el mezclado de sólidos.
2. Para poder garantizar la homogeneidad en el mezclado de los ingredientes de una determinada formulación sólida, se recomienda definir las condiciones de operación del equipo de molienda, de tal manera que se pueda predecir la distribución de tamaños de partícula en el producto resultante, para minimizar la segregación en el mezclado de sólidos.
3. Se recomienda el estudio del comportamiento de otros tipos de materiales en un molino de martillos marca Fitz Patrick, para determinar si el mismo responde al de la muestra tratada en este trabajo.

REFERENCIAS

1. The Fitz Patrick Company. SIZE REDUCTION. Unica Edición. Illinois USA, Editorial Fitz Mill, 1989.
2. Lieberman, Herbert A. / Lachman, Leon. PHARMACEUTICAL DOSAGE FORMS. 2a. Edición. New York, Editorial Marcel Dekker, Inc., 1981.
3. Helman José, FARMACOTECNIA TEORICA Y PRACTICA. Tomo IV. México, Compañía Editorial Continental S.A., 1981.

BIBLIOGRAFIA

- Geankoplis, Christie J. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. 2a. Edición. México, Editorial CECSA, 1986.
- Helman José, FARMACOTECNIA TEORICA Y PRACTICA. Tomo IV. México, Compañía Editorial Continental S.A., 1981.
- Jiménez Suazo, Pablo Enrique. ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE MEZCLADO PARA SISTEMAS DE POLVOS COHESIVOS, NO COHESIVOS Y COHESIVOS CON NO COHESIVOS EN UN MEZCLADOR GRAVITACIONAL EN FORMA DE V. (Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala) Guatemala, 1991, 119p.
- Lieberman, Herbert A. / Lachman, Leon. PHARMACEUTICAL DOSAGE FORMS. 2a. Edición. New York, Editorial Marcel Dekker, Inc., 1981.
- McCabe, Warren L. / Smith, Julian C. OPERACIONES BASICAS DE INGENIERIA QUIMICA. España, Editorial Reverté S.A., 1981.
- Perry, Robert H. / Chilton, Cecil H. BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUIMICO. 5a. Edición. México, Editorial McGraw Hill, 1986.
- Seese, William S. / Daub, G. William. QUIMICA. 5a. Edición. México, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1989. pp 688.
- Vásquez Antillon, Jose Oscar. ESTUDIO DE COMPARACION ENTRE EL MEZCLADO FISICO DE SOLIDOS GRANULARES Y LA SIMULACION DEL PROCESO EN UNA COMPUTADORA PERSONAL. (Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala) Guatemala, 1990, 40p.