

Capítulo 10. MEZCLADO Y SEGREGACIÓN

10.1. Introducción

Lograr un buen mezclado de sólidos particulares de diferente tamaño y densidad es de suma importancia para muchas industrias. Las partículas que pueden fluir se segregan naturalmente. Por ejemplo, en una bolsa de cereales o en el paquete de yerba, las partículas más grandes las encontramos mayoritariamente en la parte de arriba, mientras que las pequeñas migran al fondo. En el caso de las mezclas de líquidos miscibles y gases, el flujo convectivo logra un mezclado macro, mientras que los procesos difusivos logran el mezclado a nivel micro. Consecuentemente, las mezclas de gases y líquidos si se dejan el tiempo suficiente tienden a homogeneizar la composición de la mezcla. Las mezclas sólidas nunca alcanzan tal homogeneidad porque tienden a segregarse, mientras que los líquidos y sólidos tienden a mezclarse.

En la industria alimentaria el mezclado es utilizado frecuentemente para disminuir diferencias en propiedades de polvos como concentración, color, textura, sabor, etc.

El requerimiento de uniformidad de la composición de una dada mezcla depende de la aplicación del sistema particulado. Por ejemplo, la composición de los medicamentos debe especificarse estrictamente para asegurar su eficacia y seguridad en su aplicación. Consecuentemente el rango de variación de composición es bien estrecho. En cambio, si estamos preparando los ingredientes de una sopa deshidratada la tolerancia en el mezclado puede ser algo mayor, pero no exagerada ya que el consumidor se acostumbra a sabores, olores, consistencias, etc. Cambios abruptos en composición de tales mezclas puede conducir a la pérdida de mercado.

10.2. Mezclado de sólidos

10.2.1. Mecanismos de mezclado

Se reconoce la existencia de tres mecanismos en el proceso de mezclado de sólidos:

- *Convección*: Se produce cuando fracciones del sistema particulado total son trasladadas a otra región del espacio donde están confinadas las mezclas. Se logra en equipos que agitan o rotan la mezcla.
- *Difusión (no molecular)*: Un mezclado del tipo difusivo en sólidos se refiere por ejemplo al movimiento de partículas sobre superficies con una pendiente dada,

sólo migran por gravedad, i.e. no hay que adicionar energía para el movimiento.

- *Por esfuerzos de corte:* se producen planos de deslizamiento entre distintas regiones de la muestra. Por ejemplo si la mezcla es muy cohesiva, es recomendable utilizar equipos con paletas que ejerzan esfuerzos de corte a la mezcla, en lugar de mezcladores tipo rotatorios.

En los equipos de mezclas es común que más de un mecanismo tenga lugar durante el proceso de mezclado.

10.2.2. Mezcladores

Mezcladores de Tambor Rotatorio: En la Figura 10.1 se presentan diferentes tambores rotatorios. Si bien existe un componente convectivo en el mezclado, el mecanismo predominante es el difusivo (ocurre segregación). En la Figura 10.2 se muestra un mezclador de tambor con baffles internos para reducir la segregación.

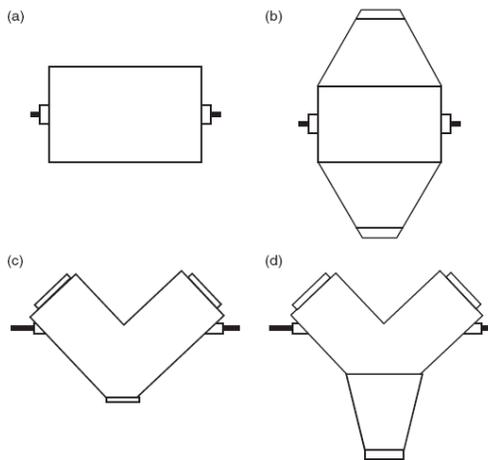


Figura 10.1. Mezcladores de tambor. a) cilindro horizontal, b) de doble cono, c) cono en V, d) cono en Y. Fuente: Ortigas-Rivas (2005).

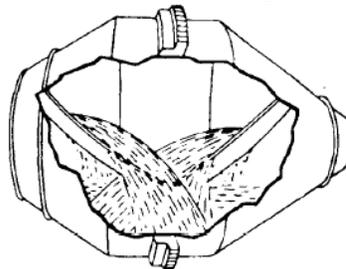


Figura 10.2. Mezcladores de tambor con baffles internos. Fuente: Walas (1990).

Mezcladores convectivos: En este tipo de equipos la circulación de sólidos se logra dentro de carcasas estáticas en las que se disponen paletas que rotan. El mecanismo

principal de mezclado es la convección, sin embargo también se produce difusión y movimiento por esfuerzos de corte. Uno de los equipos más comunes es la mezcladora de cintas, donde paletas helicoidales rotan dentro de un cilindro estático (Figura 10.3).

Otros tipos de mezcladores son los de tornillos, los cuales se muestran en la Figura 10.4. Los tornillos elevan material desde el fondo y lo desplaza hacia el tope.

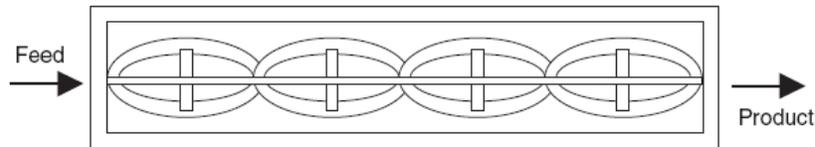


Figura 10.3. Mezclador de cintas. Fuente: Ortigas-Rivas (2005).

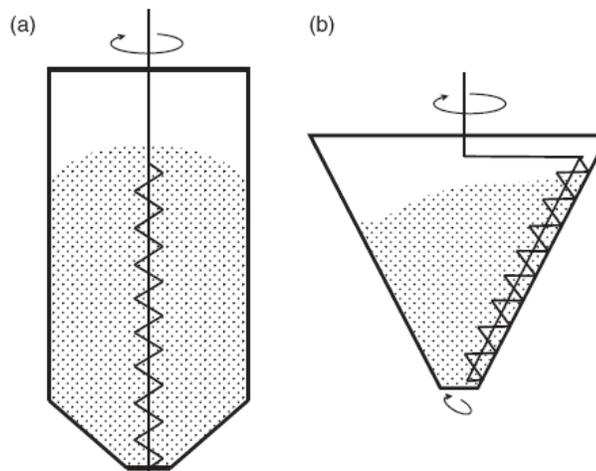


Figura 10.4. Mezcladores de tornillo. Fuente: Ortigas-Rivas (2005).

Lechos fluidizados: En estos mezcladores el mecanismo de mezclado predominante es la convección. En este equipo se puede llevar a cabo más de una operación unitaria, por ejemplo recubrimiento, enfriamiento y mezclado.

Mezcladores de alto corte: Son parecidos a los rotogranuladores, en este caso el mecanismo principal de mezclado son los esfuerzos de corte generados. Son muy usados para el mezclado de polvos cohesivos.

10.2.3. Mezclas binarias

Una mezcla perfecta de partículas de igual tamaño y distinto color (ver Figura 10.5) indica que independientemente de la región donde tomemos una muestra, encontraremos la misma proporción de partículas negras y blancas. La mezcla perfecta, a menos que se haga la selección manual, no es posible obtenerla en una

mezcla real. Lo que se pretende lograr es una mezcla al azar y evitar tener mezclas segregadas (ver Figura 10.5).

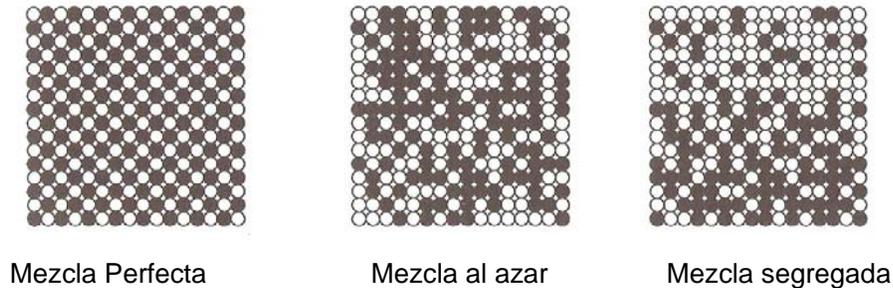


Figura 10.5. Tipos de mezclas. Fuente: Rhodes (1998).

Para cuantificar el grado de mezclado de un sistema debemos recurrir a ciertos parámetros estadísticos que ya se han definido en el Capítulo 3. El valor medio y la desviación estándar de una distribución están dados por las ecuaciones (3.26) y (3.27), respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i^* x_i}{\sum n_i^*} \quad (3.26)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i^* (x_i - \bar{x})^2}{\sum n_i^*}} \quad (3.27)$$

Respecto al mezclado de partículas, Lacy en los 1950s desarrolló algunas fórmulas que permiten estimar las diferencias (desviaciones) de composición en mezclas. Observó que en un **sistema binario**, donde la única diferencia entre las poblaciones que se mezcla es el color, la **desviación estándar de la mezcla al azar** (σ_R) está dada por:

Desviación mínima
$$\sigma_R^2 = \frac{p \cdot q}{n_0} = \frac{p(p-1)}{n_0} \quad (10.1)$$

donde n_0 es el número de partículas en la muestra, p y q representan la fracción en número de los dos componentes en la mezcla (de modo que $p+q=1$). Si la mezcla se encuentra al azar, la desviación dada por la ecuación (10.1) es entonces la mínima posible.

Por el contrario, si la mezcla se encuentra **totalmente segregada**, la desviación máxima dada por Lacy es:

Desviación máxima
$$\sigma_0^2 = p \cdot q = p(p-1) \quad (10.2)$$

Este último caso es el peor caso que podemos esperar.

Ejemplo

Una compañía de golosinas tiene en el mercado un producto que consiste en un tubo lleno de 100 confites con igual proporción de confites rojos y azules. Los confites sólo se diferencian en el color. Los confites son mezclados en un mezclador rotatorio antes de llenar los tubos. Determine las características del producto si está mezclado al azar.

Solución

$$p=0.5$$

$$q=0.5$$

$$n_0=100$$

Desviación mínima
$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(0.5)(0.5)}{100}} = \sqrt{0.0025} = 0.05$$

El número promedio de confites azules y rojos es igual a 0.5, tal como se calcula a continuación:

$$\bar{x}_{\text{rojos}} = \bar{x}_{\text{azules}} = \frac{50}{100} = 0.5$$

Si se asume una distribución normal, el **95 %** de la población debe caer entre $x = \bar{x} \pm 1.96 \sigma$. El número de confites rojos o azules que podemos encontrar en los tubos dentro de un intervalo de confianza del 95% es:

Mejor de los casos: $x = \bar{x} \pm 1.96 \sigma = 0.5 \pm (1.96)(0.05) = 0.5 \pm 0.098$

Si los confites se logran mezclar al azar en los tubos encontraremos 50 confites rojos ± 9.8 , redondeando 50 ± 10 , es decir 60 o 40. De 100 tubos que tengamos a la venta, 95 de ellos tendrían un número de confites rojos entre 60 y 40. 2.5 tubos tendrían menos que 40 y 2.5 tubos contendrían más de 60 confites rojos. Aunque la mezcla esté bien lograda no podremos tener el 100% de los tubos con 50 confites rojos. La única manera de lograrlo sería mediante un mezclado estructurado, que consiste en contar los confites durante el llenado.

10.2.4. Índices de mezclado

Las ecuaciones (10.1) y (10.2) indican los límites de mezclado, sin embargo es muy poco probable que todas las mezclas se vean representadas por estos dos casos límites. Por esta razón se definen diferentes índices de mezclado:

$$\text{Índice de mezclado de Lacey} \quad M_L = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_R^2} \quad (10.3)$$

donde σ es la desviación de la mezcla real. Cuando $M_L=0$ indica que la mezcla está completamente segregada, mientras que $M_L=1$ indica que el sistema está mezclado al azar. En la mayoría de los casos el índice M_L cae en el rango 0.75-1, por lo tanto se considera que el índice de Lacey no discrimina adecuadamente sistemas con diferentes grados de mezclado.

Poole y otros en 1964, propusieron el siguiente índice:

$$\text{Índice de mezclado de Poole} \quad M_P = \frac{\sigma}{\sigma_R} \quad (10.4)$$

La eficiencia de la mezcla (Blender efficiency) se define como sigue:

$$\text{Eficiencia de mezcla} \quad BE = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (10.5)$$

Existen muchos índices de mezclado diferentes en la literatura. Fan (2001) indica que existen más de 30 índices de mezclado reportados. La existencia de tantos índices se debe a que los sólidos son sistemas complejos, que no pueden ser caracterizados de igual manera para todas las aplicaciones.

Por último cabe agregar que el tiempo de mezclado de la mayoría de los sólidos no debe exceder los 15 min, en caso contrario las mezclas pueden segregarse. Esto indica la complejidad que reviste el tema de mezclado.

10.3. Segregación

Las partículas que tienen iguales propiedades no se segregan. Si difieren en alguna característica el estado natural de la mezcla es ir a la segregación, la cual puede ocurrir inclusive luego de la etapa de mezclado; por ejemplo durante el transporte, almacenamiento, llenado de recipientes, etc.

10.3.1. Causas de la segregación

Las propiedades que favorecen la segregación son las siguientes:

- Distribución de tamaño: El tamaño es una de las principales causas de segregación. Cuanto más anchas sean las distribuciones de tamaño de partículas mayor es la segregación. Cuanto más grandes son las partículas se observa mayor segregación.

- Densidad: Las partículas muy densas se ubican preferencialmente en el centro de las pilas. Cuando se utiliza aire para el transporte o fluidización, estas partículas sedimentan con las más gruesas.
- Forma: Las partículas esféricas tienden a comportarse como sólidos gruesos, en cambio las no esféricas tienen un comportamiento similar a los finos.
- Adhesión: Si algunas partículas experimentan adhesión con las paredes de una línea de transporte, puede conducir a problemas de segregación.
- Cohesividad: Si las partículas son cohesivas, tratan de estar juntas, por lo tanto se reduce la segregación.

10.3.2. Mecanismos de segregación

A continuación se presentan algunos mecanismos de segregación usuales.

- Segregación por trayectoria: Las distancias recorridas por las partículas son proporcionales al tamaño de las mismas, cuanto más grandes son se descargan a mayor distancia (ver Figura 10.6 a y 10.7).
- Percolación de finos: Si la mezcla vibra, las partículas más pequeñas pueden percolar entre las grandes (Figura 10.6b). Por esta razón, los finos se encuentran preferencialmente en el fondo y los gruesos en el tope. También este efecto se observa en la formación de pilas (Figura 10.8), los gruesos se concentran en la superficie de la pila y los finos en el centro de la misma.
- Ascenso de partículas grandes debido a efectos de vibración: Si una mezcla es sometida a vibración, las partículas más grandes se mueven hacia arriba. Por ejemplo se coloca una bola de acero en el fondo de un lecho de arena, luego de la vibración del lecho puede observarse que la bola asciende a la superficie. Este efecto se denomina “brazil nut effect”. En Internet se encuentran interesantes experimentos vinculados a este efecto. Si bien es muy conocido el efecto aún no se ha logrado darle una interpretación científica convincente.



- Segregación por elutriación: Cuando una mezcla se fluidiza, las partículas más pequeñas pueden elutriar siempre y cuando la velocidad del gas que circula exceda la velocidad terminal de las mismas (Figura 10.6c).

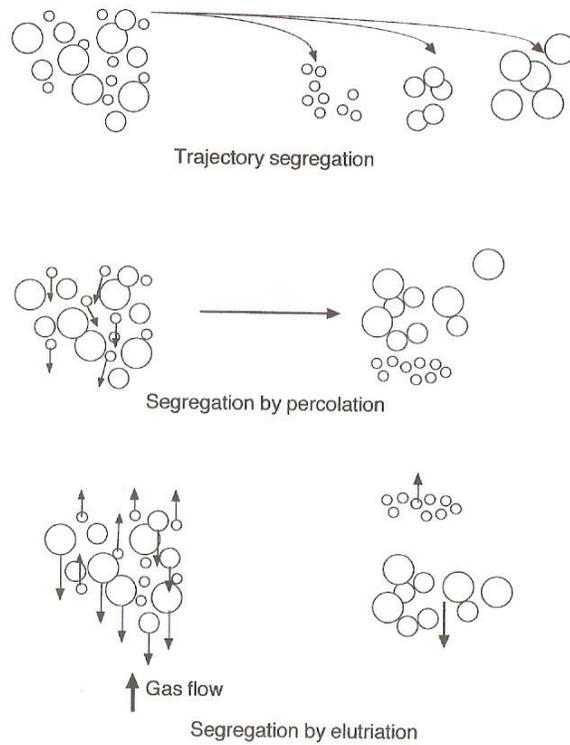


Figura 10.6. Mecanismos de segregación. Fuente: Rhodes (1998).

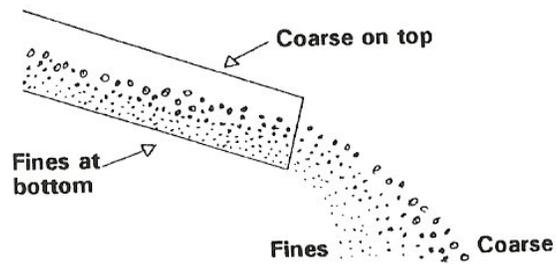


Figura 10.7. Segregación paralela. Fuente: Enstad (2001).

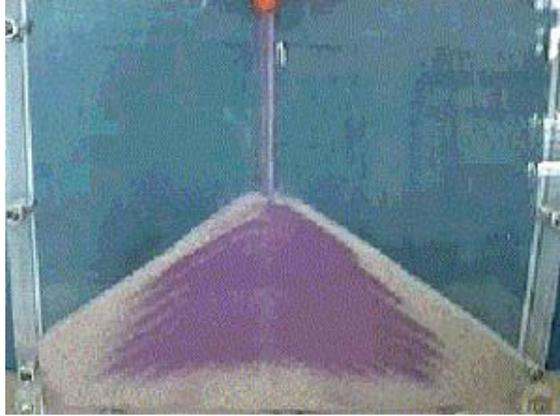


Figura 10.8. Distribución de tamaño de partículas en pilas. Fuente: Rhodes (1998).

10.3.3. Reducción de segregación

La segregación de partículas no puede ser eliminada por completo, sin embargo puede ser reducida. Los cambios en el sistema que pueden minimizar la segregación son:

- Modificación de los sólidos particulares: Una de las razones principales de segregación es la diferencia de tamaño. Por lo tanto, es posible moler las más grandes o aglomerar las más pequeñas. Otra posibilidad es tamizar, y trabajar con partículas en corte estrecho.
- Modificación del equipamiento: Por ejemplo cuando una mezcla se transporta por un ducto, los gruesos (que fluyen en la parte superior de la tubería) son descargados a mayor distancia que los finos. Se puede colocar en el punto de descarga un plano que reduzca la segregación al obligar a los gruesos a integrarse a la corriente de finos (ver Figura 10.9).

Hemos visto que cuando se forman las pilas de sólidos existe una segregación natural, concentrándose los finos en el centro de la pila y los gruesos en la superficie, una manera de evitar esta segregación es mover la tolva de descarga, de modo que la pila se construya por sucesivas pilas.

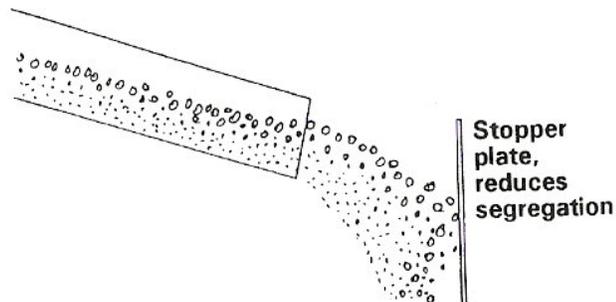


Figura 10.9. Reducción de segregación en puntos de descarga. Fuente: Enstad (2001).

- Modificación del proceso:

Una posibilidad es agregar algún ligante a la mezcla para “pegar” las partículas finas a las gruesas, sin embargo limitaciones del proceso como un valor máximo de humedad, etc., pueden hacer inviable este cambio operativo.

Si la mezcla está compuesta por partículas de distinto tamaño el transporte en líneas con pendientes debe ser evitado.

10.4. Bibliografía:

- Holdich, R.G., Fundamentals of Particle Technology, Midland Information Technology and Publishing, United Kingdom, 2002.
- Enstad, G. G., Segregation of powders – mechanisms, processes and counteraction, Sección 7.1. en “Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids”, editado por Levy A., Kalman, H., Elsevier, Amsterdam, 2001.
- Fan, L. T., Bulk-solids mixing: overview, Sección 7.6. en “Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids”, editado por Levy A., Kalman, H., Elsevier, Amsterdam, 2001.
- Ortegas-Rivas, E., Handling and Processing of Food Powders and Particulars, Capítulo 4 en “Encapsulated and Powdered Foods”, editado por Onwulata C., CRS Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2005.
- Rhodes, M., Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons, England, 1998.
- Walas, S.M., Chemical Process Equipment, Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, USA, 1990.