

**XXIII Semana del Químico
27 al 29 de Noviembre del 2006
Universidad de Colima**

**Manejo y Procesamiento de
Polvos y Granulados Alimenticios**

**Enrique Ortega-Rivas
Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos
Universidad Autónoma de Chihuahua**

Contenido del Curso

- Introducción
 - Propiedades de Cuerpos Sólidos
 - Polvos y Sólidos Granulados o Particulados
- Propiedades Primarias de Polvos Alimenticios
 - Forma y Tamaño
 - Densidad
 - Granulometría
- Propiedades Secundarias
 - Propiedades de Falla
 - Propiedades de Confinación o Empacado
 - Propiedades de Fuerza o Resistencia
- Almacenamiento de Polvos
 - Silos de Almacenamiento
 - Esfuerzos en Silos
 - Descarga Natural en Silos
 - Descarga Asistida: Promotores de Flujo y Alimentadores
- Transporte de Sólidos Granulados
 - Transportadores de Banda
 - Transportadores de Cadena: Elevadores de Cangilones
 - Transportadores de Tornillo
 - Transporte Neumático
- Procesamiento de Polvos Alimenticios
 - Aumento de Tamaño
 - Reducción de Tamaño
 - Recubrimiento de Particulados
 - Mezclado de Sólidos
 - Técnicas de Separación: Ciclones

Material Relacionado (Material Didáctico)

<http://www.fcq.uach.mx>



Materiales de Estudio

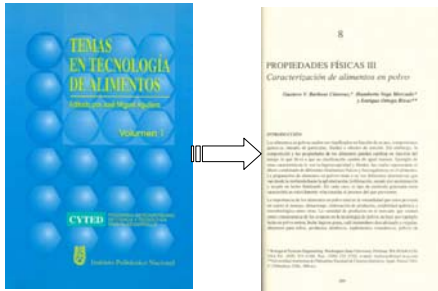


Operaciones Unitarias I

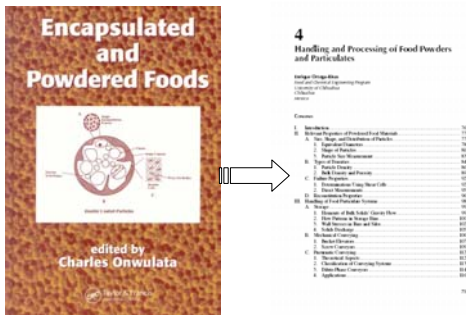


Procesamiento de Alimentos

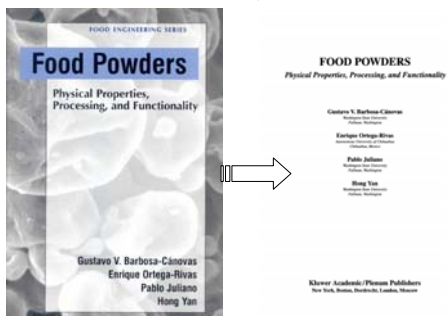
Material Relacionado (Material Publicado)



Material Relacionado (Material Publicado)

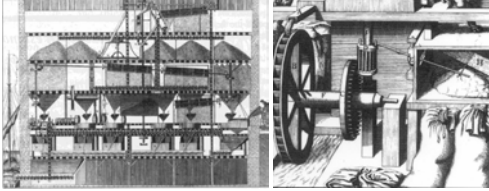


Material Relacionado (Material Publicado)



Introducción

Proceso industrial
pionero típico:
molienda de trigo



Los Sistemas Granulados Alimenticios son Variados



Característica Común de Polvos Alimenticios

Los cambios
físicos y
químicos
dependen
mucho de su
historial
temperatura-
humedad



Diferencia Fundamental entre Polvos y Particulados Alimenticios y Polvos Industriales: Forma



Hechos Relacionados con Partículas en Procesos de la Industria Alimentaria

- La granulometría de la harina de trigo es un factor importante en la funcionalidad de productos derivados
- La atrición en alimentos instantáneos en polvo reduce la facilidad de rehidratación
- El flujo errático en tolvas de extrusores afecta la reología de la pasta formada
- Una caracterización adecuada de las interacciones partícula-fluido puede optimizar la clarificación de jugos de frutas

Introducción

Propiedades de Sólidos

Existen dos casos de importancia en el procesamiento de alimentos para el caso de materiales en el estado sólido: sólidos granulados o particulados y sólidos en trozos o piezas. Los sólidos particulados incluyen desde ingredientes finamente divididos (povos) hasta gramíneas, mientras que los sólidos en trozos son aquellos en formas definidas y discretas, como frutas o galletas

Propiedades de Sólidos

Los sólidos particulados poseen una serie de propiedades que son abordadas en una disciplina ingenieril y tecnológica conocida como *Tecnología de Polvos* o *Tecnología de Partículas*

Propiedades de Sólidos

En lo concerniente a sólidos en trozos, sus propiedades serían motivo de estudio de la *Ciencia de Materiales*, como tal. La *Ciencia de los Alimentos* ha abordado, también, el estudio de sólidos de este tipo por algún tiempo

Sólidos Particulados

Propiedades Importantes

Las propiedades de los sólidos particulados se dividen, por conveniencia, en dos tipos: propiedades primarias y propiedades secundarias. Las primeras serían las inherentes de acuerdo a la naturaleza química del material, mientras que las segundas son relevantes sólo cuando el sólido se asocia con otra fase, como por ejemplo con un fluido

Propiedades Primarias

Las propiedades primarias de las partículas, tales como su forma y su densidad, junto con las propiedades primarias de un fluido (por ejemplo su densidad y viscosidad), aunadas al estado de dispersión y concentración, gobiernan las propiedades secundarias, como la velocidad de asentamiento de partículas, la rehidratación de polvos finos, la resistencia de una torta de filtración, etc.

Propiedades Primarias

La caracterización directa de las propiedades secundarias puede llevarse a cabo en la práctica, pero el objetivo final sería poder predecirlas a partir de las propiedades primarias, tal como se haría cuando se determina la resistencia al flujo de un fluido dentro de una tubería, a partir de correlaciones conocidas utilizando datos de las propiedades primarias del fluido (densidad y viscosidad) y de la tubería (rugosidad)

Propiedades Primarias

Desde que un polvo puede considerarse un sistema difásico consistente de partículas como la fase dispersa y un gas (generalmente aire) como la fase continua, la caracterización completa de un material pulverizado depende de las propiedades de la partícula como una entidad individual, de las propiedades del conjunto de las partículas y de las interacciones entre el conjunto de partículas y el gas

Propiedades Primarias

- Forma y tamaño
- Densidad
- Granulometría
- Otras

Forma de Partícula

Todos los sistemas de partículas finamente divididas se pueden considerar polvos. En la práctica, las partículas que forman un mismo polvo tendrán una forma geométrica aproximadamente similar, pero sus tamaños variarán grandemente. Muchos polvos industriales son de origen mineral (metálico y no metálico) y se han derivado, muy frecuentemente, de procesos de reducción de tamaño

Forma de Partícula

En tal caso, las partículas tendrán formas de poliedros irregulares, con caras relativamente planas en un número de 4 a 7, y con vértices y puntas cortantes. Esto se debe a la estructura atómica de los elementos centrales que constituyen a las partículas. A medida de que las partículas se hacen más finas, por manipuleo y fricción, los vértices y puntas se suavizan y los poliedros tienden a adoptar una forma esférica

Forma de Partícula

Los polvos alimenticios son, por otra parte, de origen biológico en su mayoría. La estructura molecular de las partículas que los forman serán, normalmente, mucho más complejas que las correspondientes a los polvos inertes. Las formas de los polvos alimenticios son muy diversas, incluyendo desde las muy complejas (especies molidas), pasando por las muy cristalinas (sal y azúcar granulada), y hasta las relativamente esféricas (almidón y levadura seca)

Tabla 1. Definiciones de formas de partículas

Nombre	Descripción
Acicular	Forma de aguja
Angular	Forma poliédrica
Cristalina	Forma geométrica derivada libremente en un fluido
Dentrítica	Forma cristalina ramificada
Fibrosa	Forma filamentos regular o irregular
Hojueleada	Forma plana circular u ovoide
Granular	Forma irregular aproximadamente equidimensional
Irregular	Sin forma definida
Modular	Forma irregular redondeada
Esférica	Forma de globo

Forma de Partícula

La discusión precedente pone de manifiesto que el establecimiento de un criterio estandarizado para definir la forma de las partículas de un polvo, constituirá una tarea sumamente compleja. Uno de los métodos pioneros consistió en describir la forma del contorno de las partículas utilizando la longitud L , el ancho B y el espesor T , en expresiones tales como la relación de elongación (L/B). Estas relaciones se prestan a ambigüedades, ya que la misma cifra puede obtenerse para formas prácticamente diferentes

Forma de Partícula

Como se indicó anteriormente, numerosos polvos industriales tienen partículas con formas poliédricas que tienden a una forma esférica por atrición natural, debida a manejo y procesamiento. Por lo tanto, una medición que puede describir con cierto grado de normalización la forma de las partículas se conoce como la esfericidad Φ_s y se define por:

$$\Phi_s = \frac{6V_p}{x_p S_p}$$

Tamaño de Partícula

El término “tamaño de partícula” es muy relativo y a veces difícil de definir. Se puede entender por tamaño una dimensión característica que describa a una partícula, por ejemplo alguna de las relaciones descritas. De acuerdo a la definición de esfericidad, el tamaño se puede definir como un equivalente de un diámetro que tendría la dimensión de una esfera que correspondiese a una esfericidad dada. En realidad, como se discutirá más adelante, se utiliza un concepto conocido como “diámetro equivalente” para identificar tamaños de partículas

Tamaño de Partícula

De acuerdo a lo discutido con anterioridad, un polvo posee una gama de tamaños, pero se requiere de un tamaño único que se utilice para clasificarlo o categorizarlo como tal. Un tamaño promediado, que se estudiará posteriormente, se utiliza para clasificar a los polvos de acuerdo a sus grados de finura o grosor. El tamaño mencionado se conoce como “tamaño mediano”

Tamaño de Partícula

Por convención común, para que un sistema de partículas sea considerado un “polvo”, su tamaño mediano aproximado debe ser menor de 1 mm. Es práctica común referirse a polvos “finos” y “gruesos”, y se han realizado varios intentos de estandarizar tales términos. Posiblemente, quienes han logrado más uniformizar tales conceptos sean los farmacéuticos. Por ejemplo, la Tabla 2 presenta los términos recomendados por la *Pharmacopoeia Británica*, referidos a aperturas estándares de tamices

Tabla 2. Términos recomendados por la *Pharmacopoeia Británica* para polvos

Tipo de polvo	No de malla (Estándares Británicos)	
	Todo pasa por	No más del 40% pasa por
Grueso	10	44
Moderadamente grueso	22	60
Moderadamente fino	44	85
Fino	85	-
Muy fino	120	-

Tamaño de Partícula

Por conveniencia, los tamaños de partículas se pueden expresar en diferentes unidades de acuerdo a los rangos de dimensiones de los polvos. Los polvos gruesos se pueden expresar en milímetros o centímetros, mientras que los polvos finos pueden definirse en términos de números de malla o micras y los polvos ultrafinos en micras o nanómetros. La tendencia en uso de unidades se inclina, sin embargo, a las llamadas unidades SI (MKS), por lo que los tamaños de partícula pudieran expresarse en metros, sobre todo al usarse en cálculos ingenieriles. En representaciones gráficas, las micras son recurridas, sobre todo al referirse a polvos ultrafinos. Algunos tamaños medianos de polvos alimenticios se presentan en la Tabla 3

Tabla 3. Rangos aproximados de tamaños medianos de algunos polvos alimenticios comunes

Polvo	Malla (Estándares Británicos)	Micras
Granos de arroz y cebada	6-8	2 800 – 2 000
Azúcar granulada	30-34	500 – 355
Sal común	52-72	300 – 210
Cocoa	200-300	75 – 53
Azúcar pulverizada	350	45

Densidad de Partícula

La densidad de una partícula se define como su masa total dividida entre su volumen. Se considera de gran relevancia para determinar otras propiedades como estructura y forma de las partículas, por lo que requiere definirse con detalle. Dependiendo de cómo se mide el volumen, se pueden considerar varios tipos de densidades: la *densidad real*, la *densidad aparente*, y la *densidad efectiva (o aerodinámica)*. Desde que las partículas contienen normalmente fisuras, irregularidades, o poros, tanto abiertos como cerrados, todas estas definiciones resultan prácticamente diferentes

Densidad de Partícula

La densidad real representa la masa de la partícula dividida por su volumen, excluyendo los poros tanto abiertos como cerrados, siendo la densidad del material sólido del cual se forman las partículas. Para sustancias químicas puras, es la densidad que aparece en textos de referencia de datos físicos y químicos. Desde que la mayoría de los materiales inertes consisten de partículas rígidas, mientras que las sustancias biológicas se constituyen de partículas suaves y porosas, la densidad real de muchos polvos alimenticios será, normalmente, considerablemente menor que la de polvos minerales

Tabla 4. Densidades de polvos alimenticios comunes

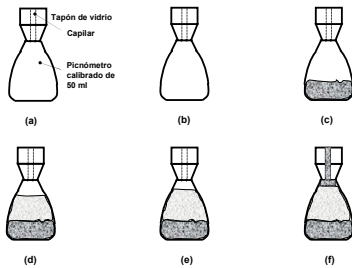
Polvo	Densidad (kg/m ³)
Glucosa	1 560
Sucrosa	1 590
Almidón	1 500
Celulosa	1 270 – 1 610
Proteína (globular)	~1 400
Grasa	900 – 950
Sal	2 160
Ácido cítrico	1 540

Densidad de Partícula

La densidad aparente se define como la masa de la partícula dividida por su volumen excluyendo sólo los poros abiertos, y se puede medir por métodos de desplazamiento de líquido o gas, conocidos como picnometría. La densidad efectiva se refiere a la masa de la partícula dividida por su volumen incluyendo poros, tanto cerrados como abiertos.

En este caso el volumen es determinado considerando una capa aerodinámica “vista” por un gas que pasa sobre la partícula

Densidad de Partícula: Picnometría de Líquido



Determinación de densidad por picnometría de líquido: (a) partes del picnómetro, (b) pesado, (c) llenado a 1/2 con polvo, (d) adición de líquido casi al tope, (e) eliminación de burbujas, (f) llenado completo y pesado final

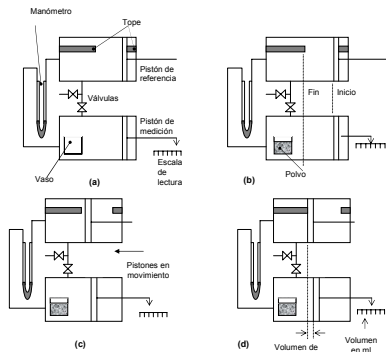
Densidad de Partícula: Picnometría de Líquido

La densidad de la partícula ρ_s es el peso neto de polvo seco dividido por el volumen neto del polvo, calculado del volumen del picnómetro restando el volumen de líquido agregado, o sea:

$$\rho_s = \frac{(m_s - m_0)\rho}{(m_1 - m_0) - (m_{sl} - m_s)}$$

donde m_s es el peso del picnómetro con el polvo, m_0 es el peso del picnómetro vacío, ρ es la densidad del líquido, m_1 es el peso del picnómetro con el líquido, y m_{sl} es el peso del picnómetro con el sólido y el líquido

Densidad de Partícula: Picnometría de Gas



Granulometría (Distribución de Tamaños de Partículas)

La granulometría de un polvo constituye parte fundamental de su caracterización, ya que está íntimamente ligado al comportamiento del material y/o las propiedades físicas del producto. En la industria alimentaria se utilizan numerosos polvos, como materias primas y como productos terminados. Muchas propiedades secundarias, tales como capacidad de flujo y compresibilidad, son afectadas por la granulometría de los polvos. La representación adecuada de la granulometría de un polvo será, consecuentemente, de gran relevancia

Granulometría (Distribución de Tamaños de Partículas)

La granulometría de un polvo consiste en una representación adecuada (tabular o gráfica), de la forma en que las diferentes fracciones de tamaños que conforman dicho polvo contribuyen al total de los tamaños presentes en una muestra. La representación gráfica es, quizá, la más recurrida y se forma de representar en un sistema de coordenadas planas los tamaños clasificados en intervalos de clase, contra la frecuencia u ocurrencia de dichos tamaños en una muestra dada

Granulometría (Distribución de Tamaños de Partículas)

Los tamaños tabulados contra la frecuencia se determinan por medio de alguna técnica analítica, en forma indirecta por lo general, y basándose en la respuesta de las partículas a un estímulo externo como el paso por un hueco, la velocidad de asentamiento en un fluido o la difracción de un rayo incidente de luz. La frecuencia se expresa en ocurrencia específica contra el total de muestra considerado, así como en fracción o porcentaje de una fracción dada con respecto al total de las fracciones consideradas

Granulometría (Distribución de Tamaños de Partículas)

Para determinar como se expresará el tamaño a tabular, se puede hacer uso del concepto de equivalencia de cualquier forma, en función de la esfericidad posible de ésta. De este razonamiento surge el concepto de “diámetro equivalente” y los diferentes diámetros equivalentes dependen de las diferentes maneras en que las partículas se clasifican. Las Tablas siguientes describen algunos diámetros equivalentes comunes

Tabla 5. Definiciones de diámetros de esfera equivalente

Símbolo	Nombre	Propiedad Equivalente de una Esfera
X_v	Diámetro volumétrico	Volumen
X_s	Diámetro superficial	Superficie
X_{sv}	Diámetro superficie-volumen	Relación superficie a volumen
X_d	Diámetro de arrastre	Resistencia al movimiento en el mismo fluido a la misma velocidad
X_T	Diámetro de caída libre	Velocidad de caída libre en el mismo líquido o la misma densidad de partícula.
X_{st}	Diámetro de Stokes	Velocidad de caída libre usando la Ley de Stokes ($Re < 0.2$)
X_A	Diámetro de tamiz	Paso a través de la misma apertura cuadrada

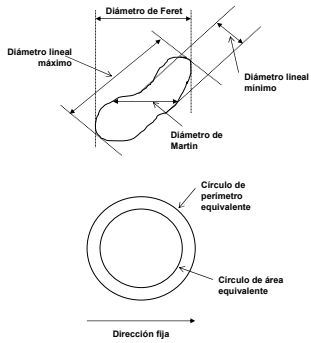
Tabla 6. Definiciones de diámetros de círculo equivalente

Símbolo	Nombre	Propiedad Equivalente de un Círculo
X_a	Diámetro del área proyectada	Área proyectada si la partícula reposa en posición estable
X_p	Diámetro de área proyectada	Área proyectada si la partícula es orientada al azar.
X_c	Diámetro perimetral	Perímetro del contorno.

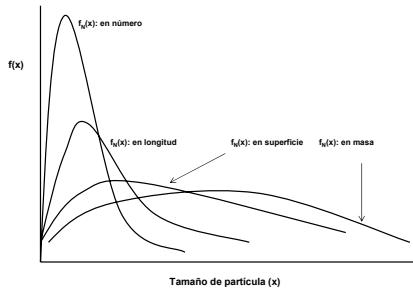
Tabla 7. Definiciones de diámetros estadísticos

Símbolo	Nombre	Dimensión Medida
X_F	Diámetro de Feret	Distancia entre dos tangentes a lados opuestos de la partícula
X_M	Diámetro de Martín	Longitud de la línea bisectriz de la partícula
X_{CH}	Diámetro de cuerda máxima	Longitud máxima de la línea que delimita el contorno de la partícula

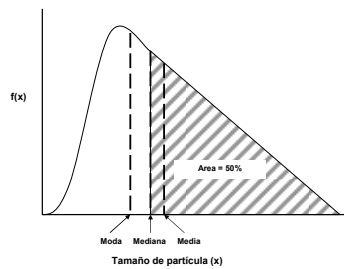
Granulometría: Ejemplos de Diámetros Equivalentes



Forma de Expresar Granulometrías



Medidas de Tendencia Central



Distribuciones de Frecuencias Absoluta y Acumulativa

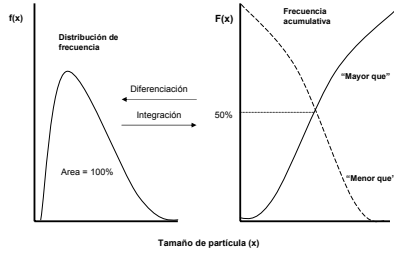
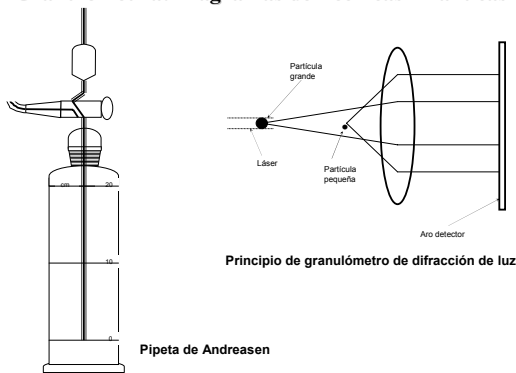


Tabla 8. Algunas técnicas analíticas de determinación de granulometrías

Principio y Método	Rango Aproximado (μm)	Tipo de Diámetro	Tipo de Distribución
Microscopía óptica	1-50	X_F, X_M	Por número
Microscopía electrónica	0.001-5	X_{CH}	Por número
Tamizado convencional	40-100	X_A	Por masa
Tamices electroformados	5-120	X_A	Por masa
Sedimentación	2-100	X_{st}	Por masa
Centrifugación	0.05-25	X_{st}	Por masa
Fotosedimentación	2-100	X_{st}, X_f	Por superficie
Difracción laser	2-500	X_{sv}	Por volumen
Conteo electrosensible	0.5-300	X_v	Por número

Granulometría: Diagramas de Técnicas Analíticas



Propiedades Secundarias

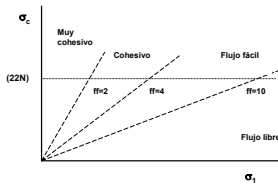
Las principales propiedades secundarias son:

- Propiedades de falla
- Propiedades de empaqueo
- Propiedades de resistencia

Propiedades de Flujo

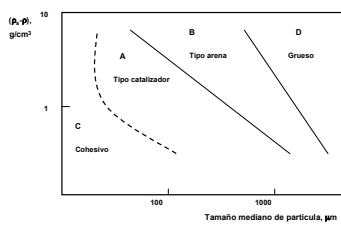
Tabla 9. Clasificación de polvos de acuerdo a Jenike

Tipo de polvo	Valor de f a $\sigma_c = 22.3 \text{ N}$
Muy cohesivo	Menor de 2
Cohesivo	Entre 2 y 4
Flujo fácil	Entre 4 y 10
Flujo libre	Mayor de 10



Propiedades de Flujo

Clasificación de polvos de acuerdo a Geldart



Cohesión en Polvos Alimenticios

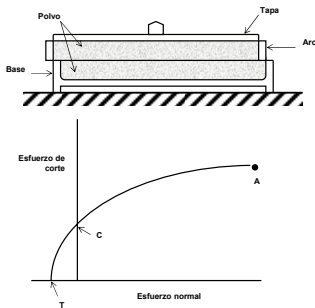
En la industria de procesamiento de alimentos se manejan un número considerable de polvos que pueden catalogarse como finos y muy finos, de acuerdo a los criterios ya expuestos. A medida de que un polvo es más fino, las fuerzas de atracción interparticulares son muy grandes al compararse con el peso de las partículas individuales, por lo que se dice que son cohesivos, y presentan problemas graves de flujo. Por ejemplo, las partículas de un polvo cohesivo pudieran mantenerse inmóviles en la inmediación de la abertura de un silo, miles de veces mayor que el diámetro de ellas

Cohesión en Polvos Alimenticios

Los problemas de flujo se presentan con polvos cohesivos de cualquier naturaleza, pero se agravan con polvos alimenticios, los cuales tienden a ser más sensitivos a alteraciones químicas y fisicoquímicas que pueden afectar sus propiedades y composición. Tales características pueden complicar seriamente las propiedades de flujo, ya que los polvos alimenticios pueden humectarse o liberar sustancias pegajosas, por efecto de la presión, la temperatura o la humedad relativa, entre otros factores

Determinación de la Cohesión

La celda de Jenike y la curva de fluencia



Cohesión en Polvos Alimenticios

La ecuación empírica de Warren-Spring

$$\left(\frac{\tau}{C}\right)^n = \frac{\sigma}{T} + 1$$

Tabla 10. Cohesión de algunos polvos alimenticios

Material	Contenido de Humedad (%)	Cohesión (g/cm ²)
Almidón de maiz	<11.0	4 – 6
Almidón de maiz	18.5	13
Gelatina	10.0	1
Jugo de toronja	1.8	8
Jugo de toronja	2.6	10 – 11
Leche deshidratada	1.0	7
Leche deshidratada	4.4	10
Cebolla en polvo	<3.0	<7
Cebolla en polvo	3.6	8 – 15
Harina de soya	8.0	1

Propiedades de Falla

Para garantizar flujo estable y confiable es necesario determinar la capacidad de fluir de los polvos alimenticios. Las fuerzas involucradas en el flujo de polvos son la fuerza de gravedad, la de fricción, la de cohesión (partícula-partícula) y la de adhesión (partícula-material). Otros factores que afectan el flujo serían las propiedades superficiales de las partículas, sus formas y granulometrías, así como las características geométricas de los equipos. Por lo tanto, es difícil contar con una teoría general de aplicación para cualquier polvo alimenticio en cualquier condición

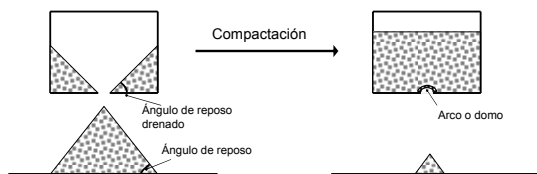
Propiedades de Falla: El Ángulo de Reposo

La percepción de que la posibilidad de fluir de un polvo es función del ángulo de reposo, y que los criterios de diseño de silos pueden basarse en dicho ángulo, es errónea y debe evitarse. Como se ha discutido con oportunidad los polvos de cualquier tipo son sistemas dispersos difásicos. En reposo los polvos se consolidan, por lo que el ángulo de reposo es indeterminado ya que depende del historial de una muestra en particular. En confinamiento, existen otros ángulos de relevancia en el diseño de sistemas de almacenamiento de polvos

Ángulo de Reposo y Consolidación

Un polvo de bajo grado de cohesividad puede fluir uniformemente a través de un orificio en la base de un recipiente para formar una pila con una pendiente igual al ángulo de reposo. Sin embargo, después de comprimirse por algún tipo de vibración o sacudida, el flujo será menos uniforme o se detendrá por completo, debido a la formación de un arco cohesivo estable sobre el orificio

Ángulo de Reposo y Consolidación



Efecto de la consolidación de un polvo en la capacidad de fluir

Ángulo de Reposo y Consolidación

Un cambio leve en la densidad a granel del material causó un cambio dramático en la capacidad de fluir. Un rasgo relevante de un polvo se refiere a la forma en que el esfuerzo de corte varía con el esfuerzo de consolidación. Las propiedades utilizadas para identificar y cuantificar las relaciones entre estos esfuerzos se conocen como “propiedades de falla o ruptura de polvos”

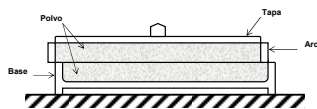
Propiedades de Falla

Las propiedades de falla son:

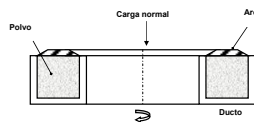
- Ángulo efectivo de fricción interna (δ)
- Ángulo de fricción con la pared (ϕ)
- Función de falla (F)
- Cohesión (C)
- Adhesión (T)

Determinación de las Propiedades de Falla

Las propiedades de falla se pueden determinar con una celda de corte

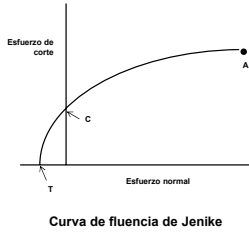


La celda de Jenike



La celda de corte anular

Determinación de las Propiedades de Falla



Determinación de las Propiedades de Falla

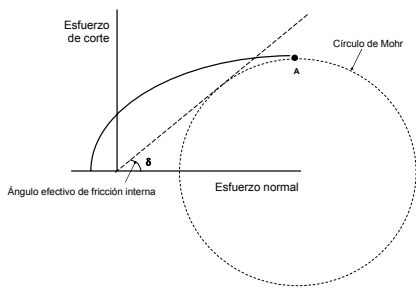
La Ecuación de Warren-Spring

$$\left(\frac{\tau}{C}\right)^n = \frac{\sigma}{T} + 1$$

donde τ es el esfuerzo de corte, C es la cohesión, σ es el esfuerzo normal, T es la adhesión, y n el índice de corte o cizalla ($1 < n < 2$)

Determinación de las Propiedades de Falla

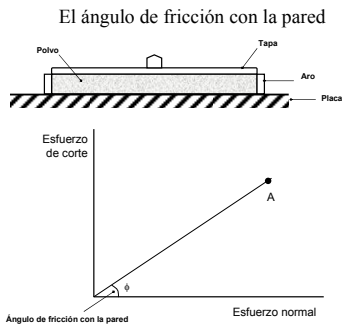
El ángulo efectivo de fricción interna puede derivarse a partir de un círculo de Mohr, como se muestra



Determinación de las Propiedades de Falla

El ángulo de fricción con la pared puede medirse sustituyendo la base de la celda de Jenike por una placa del material de construcción de un silo (u otro recipiente o equipo pertinente). El aro de la celda de Jenike se colocarán sobre la placa citada, se llenará del polvo en cuestión y se colocará la tapa, para llevar a cabo un experimento similar al que se utiliza para derivar una curva de fluencia. En este caso la figura derivada de graficar τ vs σ tendrá una tendencia lineal, y su pendiente representará al ángulo de fricción con la pared

Determinación de las Propiedades de Falla

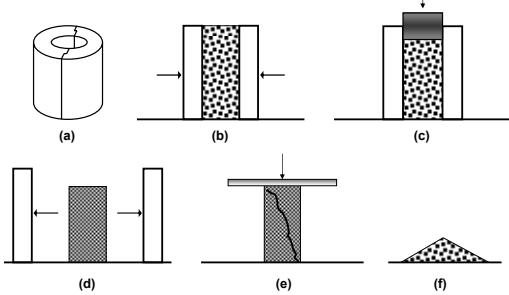


Determinación de las Propiedades de Falla

La función de falla puede medirse utilizando un tubo de pared gruesa partido en dos mitades, con una longitud de poco más del doble del diámetro. Las mitades del cilindro se unirán por una especie de abrazadera y se llenará el hueco con el polvo a caracterizar. Utilizando un pistón, el polvo se consolidará hasta que, al separar las mitades del cilindro, mantenga una columna estable comprimida. Se impone, entonces, a la columna del material un esfuerzo normal hasta que colapse. Se registran los esfuerzos de compactación y de colapsado, para determinar una gráfica, que representa en sí, a la función de falla

Determinación de las Propiedades de Falla

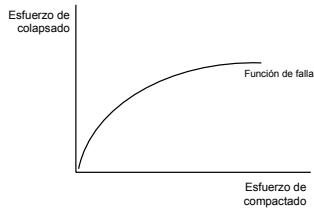
La Función de Falla



(a) instrumento medidor, (b) llenado con muestra, (c) esfuerzo de compactación, (d) columna estable de material, (e) esfuerzo de colapsado, (f) falla del material

Determinación de las Propiedades de Falla

La Función de Falla



Propiedades de Empacado

Cada vez que una muestra particular de un polvo se vierte en un recipiente, las partículas individuales se ubican en posiciones diferentes al azar, por lo que la estructura de tal polvo es diferente. Como se comentó en su oportunidad, es difícil predecir las propiedades secundarias de un polvo a partir de las primarias, por lo que se requieren técnicas para medir las propiedades secundarias directamente. Desde que las mediciones experimentales para determinar las propiedades secundarias estarán sujetas a los rearrreglos estructurales que los polvos llevan a cabo en cada cambio de posición, las lecturas experimentales pueden tener grados altos de dispersión. En la medición de propiedades secundarias es crítico tratar de llevar a cabo experimentación, tan reproducible como sea posible

Densidad a Granel y Porosidad

Cuando un polvo llena un recipiente de un volumen conocido V y la masa del polvo es m , entonces a densidad del material será m/V . Sin embargo, si el recipiente se expone a algún tipo de vibración o sacudida, en la mayoría de los casos se observará que el volumen del polvo se reduce dentro del recipiente, y será necesario agregar más polvo para rellenar y completar el volumen. Si la masa que llena al volumen es ahora m' , la densidad ajustada será, evidentemente $m'/V > m/V$. Este cambio obvio de densidad justamente descrito, ha sido causado por la influencia de la fracción de volumen que dentro de un lecho de partículas es ocupado por un gas (aire generalmente). Esta fracción se conoce comúnmente como la "porosidad" y afecta directamente las propiedades de empaqueo de los polvos

Densidad a Granel y Porosidad

La densidad original del polvo relatado será la densidad a granel (propiedad secundaria), y se encuentra relacionada a la porosidad y a la densidad del polvo (propiedad primaria) por:

$$\rho_b = \rho_s(1 - \varepsilon) + \rho_a \varepsilon$$

donde ρ_b es la densidad a granel, ρ_s es la densidad de la partícula, ε es la porosidad, y ρ_a es la densidad del aire. Como la densidad del aire es sumamente pequeña comparada con la del polvo, puede despreciarse y la porosidad puede representarse por:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_s - \rho_b)}{\rho_s}$$

Densidad a Granel y Porosidad

Existen tres tipos de densidad a granel: *aireada*, *vertida* y *comprimida*. Cada una de ellas depende en la forma en que la muestra ha sido manipulada. Aunque existen esfuerzos por estandarizar los términos, las definiciones y determinaciones de estas densidades son sumamente relativas, e incluso, la forma de determinarlas es propia de cada empresa o laboratorio. En consecuencia, la literatura es confusa respecto a todos estos términos. Algunos expertos consideran a la densidad "vertida" como densidad a granel "suelta o floja", mientras que otros se refieren a ella como "densidad aparente". El significado de densidad aireada es también muy confuso. En sentido estricto significaría que las partículas están completamente separadas dentro del lecho por una capa de aire y que, en la realidad, ninguna puede estar en contacto con otra

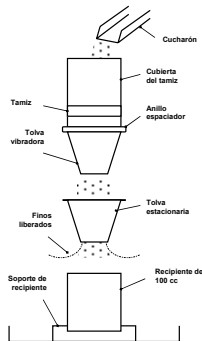
Densidad a Granel y Porosidad

Para el caso de muchos polvos alimenticios, que probablemente sean cohesivos, los términos más comúnmente usados para expresar densidad a granel son densidad suelta, al referirse a la densidad vertida y densidad compactada, para el caso de materiales después de vibración. Otra manera de expresar densidad a granel es en la forma de una fracción de la densidad de partícula, referida ocasionalmente como “densidad teórica”. Para evitar confusiones, sobre todo en tecnología de alimentos, es práctica común recurrir más a la porosidad que algún tipo de densidad difícil de definir

Densidad a Granel y Porosidad

La densidad a granel aireada es, en términos prácticos, la densidad cuando el polvo se encuentra empacado de la forma más suelta posible. Tal estructura se puede lograr dejando caer una “nube” muy dispersa de partículas individuales a un recipiente de medición. Alternativamente se puede fluidizar el lecho por medio de un gas, para retirar lentamente el caudal de este, con la finalidad de que las partículas se asienten lo más lentamente posible y conserven la estructura suelta. Evidentemente la estructura tan floja es poco estable, por lo que incluso el rasado del nivel para medir el volumen, puede causar que la estructura colapse y se generen errores de medición

Densidad a Granel: Densidad Aireada



Densidad a Granel y Porosidad

La densidad vertida es ampliamente usada, pero su medición se efectúa bajo requerimientos específicos de una compañía o industria particular. En algunos casos el volumen ocupado por una masa específica de polvo se puede medir convenientemente, pero la eliminación del error experimental es difícil de erradicar. Para minimizarlo se toman medidas de estandarización como uso de recipientes de boca ancha, altura constante de vertido, etc.

Densidad a Granel y Porosidad

La densidad compactada, como su nombre lo indica, será la densidad a granel de un polvo después de haber sido sometido a algún tipo de vibración. La vibración se puede hacer en forma manual, pero su reproducibilidad sería muy pobre. Por tal motivo se prefiere el uso de zarandas mecánicas, como las empleadas en tamizado de sólidos, en las que puedan establecerse y programarse lapsos y frecuencias, con la finalidad de minimizar el error de medición, hasta donde sea posible

Densidad a Granel y Porosidad

La Tabla 11 presenta densidades a granel de diferentes polvos alimenticios. Como puede apreciarse, con contadas excepciones, los polvos alimenticios poseen densidades a granel en el rango entre 300 y 800 kg/m³. Tal como se enlista en una tabla precedente, las densidades de partícula de muchos polvos alimenticios se encuentran en el rango de 1400 kg/m³. Las diferencias entre los tipos de densidades (ρ_s y ρ_p) para el mismo polvo alimenticio, son más marcadas que para la mayoría de los sólidos inertes, lo que indica que las partículas de los polvos poseen estructuras generalmente más suaves y más porosas. Por lo tanto, en términos generales los lechos de polvos alimenticios pueden alojar más aire, y la porosidad es una variable que cobra gran relevancia en procesamiento de alimentos granulados o particulados

Tabla 11. Densidades a granel aproximadas para varios polvos alimenticios

Polvo	Densidad a granel (kg/m ³)	Contenido de humedad (%)
Alimento para bebé	400	2.5
Cacao	480	3 - 5
Café (tostado y molido)	330	7
Café (instantáneo)	470	2.5
Crema para café	660	3
Harina de maíz	560	12
Almidón de maíz	340	12
Huevo en polvo	680	2 - 4
Gelatina (molida)	680	12
Celulosa microcristalina	610	6
Leche en polvo	430	2 - 4

Almacenamiento de Polvos

Introducción. Formas de Almacenamiento

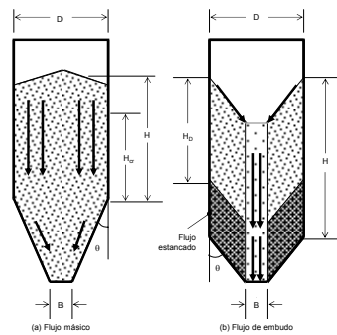
- Intemperie: Pilas o montones expuestos al ambiente
- Confinado: Recipientes, normalmente llamados *silos*

Depósitos para Almacenaje: Silos

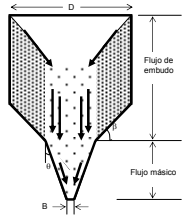
Silos

- Tipos de silos
- Patrón de flujo
- Geometría de tolva

Tipos de silos en función del patrón de flujo

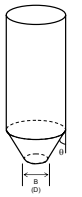


Tipos de silos en función del patrón de flujo

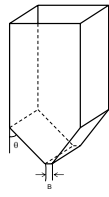


(c) Flujo expandido

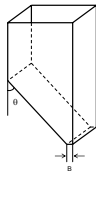
Tipos de tolva e influencia en forma de flujo



(a) Flujo axial simétrico

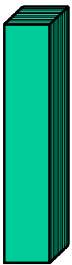


(b) Flujo en planos simétrico



(c) Flujo en planos asimétrico

Esfuerzos en Recipientes de Flujo Axial-simétrico



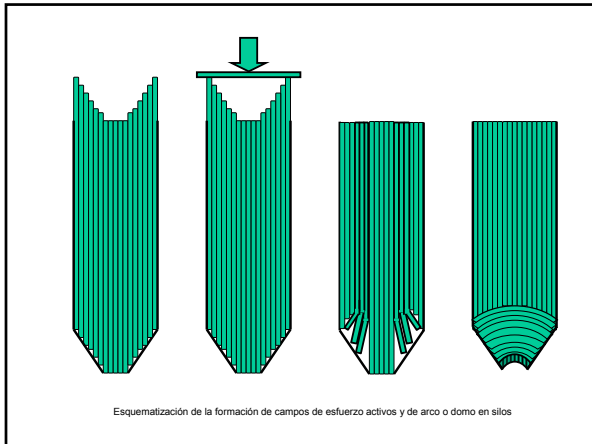
Conceptualización tridimensional del flujo de sólidos en planos

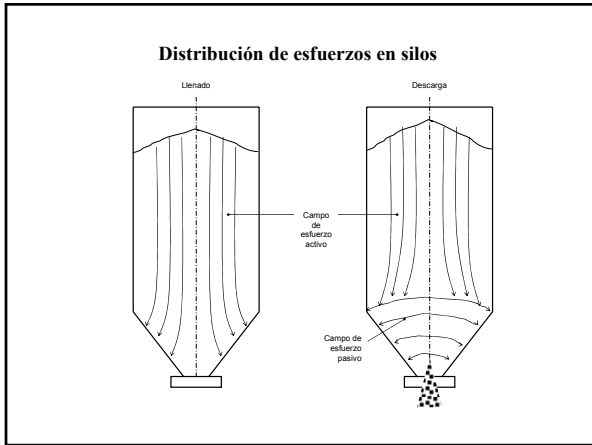


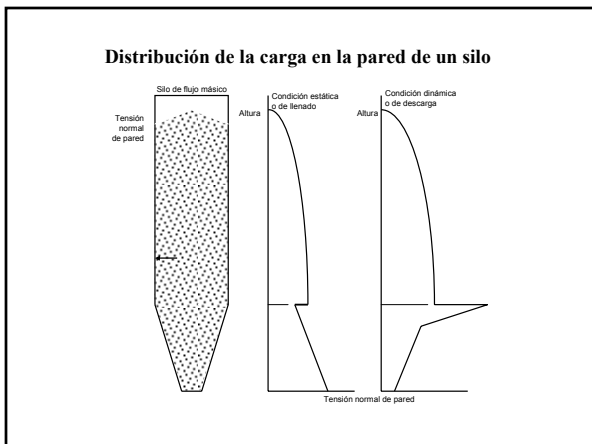
Conceptualización tridimensional del flujo de sólidos en líneas



Conceptualización bidimensional del flujo de sólidos en planos o líneas







Ecuación de Janssen del esfuerzo: presión estática vertical p_v en paredes de recipientes cilíndricos

$$p_v = \frac{g\rho_b D}{4\mu'K'} \left[1 - e^{-\left(\frac{4\mu'K'h}{D}\right)} \right]$$

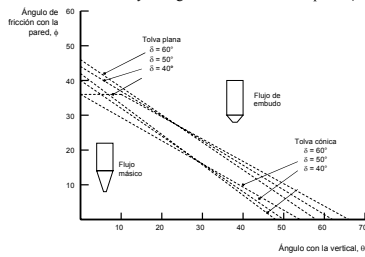
donde: g es la aceleración de la gravedad, ρ_b es la densidad a granel de los sólidos, D es el diámetro del silo, μ' es el coeficiente de fricción sobre la pared y h es la profundidad de los sólidos almacenados. K' es la relación de la presión horizontal a la vertical y se puede expresar como:

$$K' = \frac{1 - \text{sen}\delta}{1 + \text{sen}\delta}$$

donde: δ es el ángulo efectivo de fricción interna de los sólidos almacenados

Descarga Natural en Silos

Los límites de flujo en masa y flujo tipo embudo para tolvas cónicas y para tolvas planas dependen del ángulo con la vertical θ , el ángulo efectivo de fricción interna δ y el ángulo de fricción con la pared ϕ



Abertura de la tolva para sólidos gruesos

Por medio de un análisis de fuerzas en equilibrio para un material granular en la zona de la tolva se puede demostrar que:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{\rho_b g B}{H(\theta)} \left[1 - \frac{a}{g} \right]$$

donde: $\bar{\sigma}_1$ es el esfuerzo actuando en el arco a un ángulo de 45° , ρ_b es la densidad a granel del sólido, g es la aceleración de la gravedad, B es la abertura de la tolva, $H(\theta)$ es un factor que toma en cuenta variaciones en grosor del arco, el ángulo con la vertical y el tipo de tolva (cónica o plana), y a es la aceleración de descarga del sólido granular

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

Se puede demostrar que la abertura mínima de la tolva para prevenir la formación del arco cohesivo es función del estado de equilibrio estático, o sea cuando $a=0$, por lo que sustituyendo y despejando de la ecuación anterior:

$$B_{min} = \frac{\bar{\sigma}_1 H(\theta)}{\rho_b g}$$

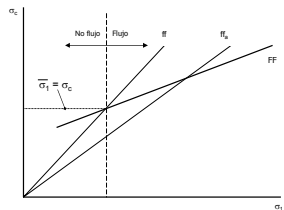
La variable $H(\theta)$ tiene un valor de 2.4 aproximadamente para tolvas cónicas y de 2.2 aproximadamente para tolvas con abertura cuadrada.

Para determinar el valor de σ_1 se hace uso de curvas de diseño, de la función de falla FF y del factor de flujo ff , el cual puede definirse por la relación:

$$ff = \frac{\bar{\sigma}_1}{\sigma_c}$$

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

Como se muestra en la siguiente figura, se puede graficar la función de falla y el factor de flujo en la misma gráfica. Las dos líneas se intersectan en un punto crítico

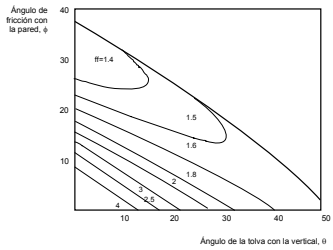


Gráfica de diseño para geometría de tolva

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

El punto crítico de intersección en la figura anterior se denota como esfuerzo de corte crítico aplicado, siendo el esfuerzo definido en las ecuaciones anteriores. Al obtenerlo y sustituirlo se determinará la dimensión mínima de abertura B_{min} necesaria para promover el flujo del material almacenado. Para facilitar la estimación del factor de flujo, se han elaborado gráficas de diseño para tolvas cónicas y planas y para diversos valores del ángulo efectivo de fricción interna. Una de estas gráficas se presenta en la figura siguiente

Abertura de la tolva para sólidos gruesos



Gráfica del factor de flujo para tolva cónica y ángulo efectivo de fricción interna β de 40°

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

Como puede verse en la figura anterior, se grafica el ángulo de fricción con la pared ϕ contra la pendiente de la tolva θ . Sin embargo, en este caso aparecen curvas de nivel para representar valores del factor de flujo ff . Esta gráfica es exclusivamente para diseño de tolvas de flujo en masa, por lo que existe sólo en una región triangular que comprende las curvas de nivel mencionadas. Para un valor constante del ángulo efectivo de fricción interna, y de acuerdo al ángulo de fricción con la pared ϕ , se selecciona la pendiente de tolva θ , unos 3° menos que el valor limitante. Una vez que se definen estas variables, se determina el valor de ff a partir de las líneas de nivel mostradas, cuyo inverso dará la pendiente de la línea del factor de flujo que intersectará a la curva de función de falla para obtención del valor de σ_1 .

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

Por lo que respecta al caudal másico o velocidad de flujo en masa, puede deducirse una expresión a partir de los dos componentes de la aceleración

$$a = a_c + a_v$$

donde: a_c es el componente convergente debido al canal de flujo y a_v es el componente debido al incremento de velocidad una vez que se inicia el flujo

Se puede demostrar que:

$$a = g \left[1 - \frac{ff}{ff_a} \right]$$

donde: ff es el factor de flujo crítico basado en la dimensión mínima de arqueado, mientras que ff_a es el factor de flujo real basado en la dimensión de la abertura. También se sabe que:

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

$$a_c = \left[\frac{2V^2(m+1)}{B} \right] \tan \theta$$

donde: V es la velocidad de descarga y m es una constante cuyo valor es de cero para tolvas planas y de la unidad para tolvas cónicas. Sustituyendo las dos ecuaciones anteriores en la primeras y despejando a_c :

$$a_v = g \left[1 - \frac{ff}{ff_a} \right] - \frac{2V^2(m+1) \tan \theta}{B}$$

A medida que la velocidad de descarga se incrementa, a_c tiende a cero, por lo que una velocidad terminal promediada V_p se alcanzará sustituyendo $a_c=0$ en la ecuación previa, dando origen a la siguiente relación:

Abertura de la tolva para sólidos gruesos

$$V_a = \sqrt{\frac{Bg}{2(m+1) \tan \theta} \left[1 - \frac{ff}{ff_a} \right]}$$

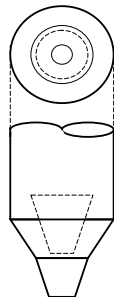
El caudal en masa Q_0 se representa por:

$$Q_0 = \rho_b B^{(1+m)} L^{(1-m)} (\pi/4)^m V_a$$

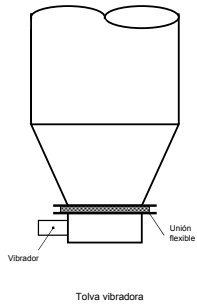
donde: B es el diámetro o ancho de abertura y L es la longitud de abertura

Descarga Asistida: Promotores de Flujo y Alimentadores

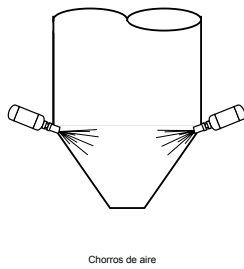
Promotores de flujo:
Dispositivos pasivos:
Insertos



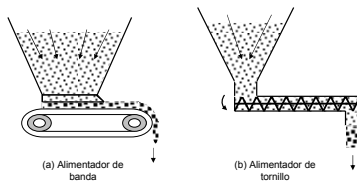
Promotores de flujo: dispositivos activos

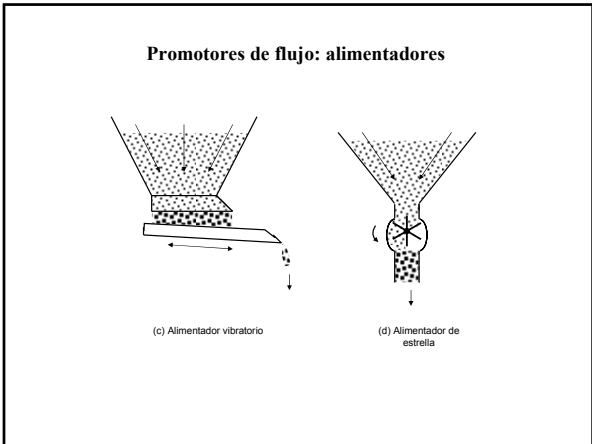


Promotores de flujo: dispositivos activos



Promotores de flujo: alimentadores





Transporte de Sólidos Granulados

Introducción. Formas de Transporte

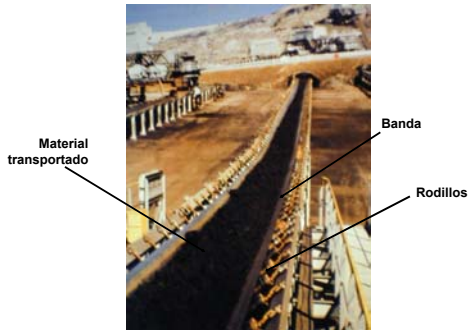
- **Transportadores mecánicos**
 - Transportadores de banda
 - Transportadores y elevadores de cadena
 - Transportadores de tornillo
- **Transporte neumático**
 - Sistemas de fase densa
 - Sistemas de fase diluida

Transportadores de Banda

Componentes

- Poleas
- Banda o correa
- Rodillos, tensores, etc.
- Sistema motriz
- Descargadores

Transportadores de Banda: Partes

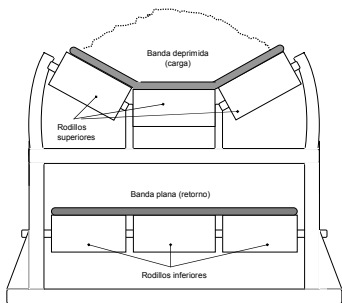


Transportadores de Banda: Rodillos



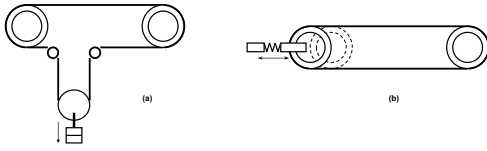
Rodillos de plástico montados sobre eje y cojinetes de acero inoxidable

Transportadores de Banda: Tipos de Rodillos



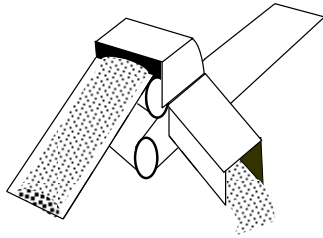
Vista seccional del montaje de rodillos locos de banda transportadora

Transportadores de Banda: Tensores



Tensores de banda transportadora: (a) por gravedad, (b) polea deslizante

Transportadores de Banda: Descargadores



Descargador móvil en banda transportadora

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

La potencia consumida por las bandas transportadoras está compuesta por la potencia necesaria para mover la banda vacía, la potencia necesaria para mover la carga, la potencia para vencer la fricción de los rodillos, la potencia para accionar los posibles descargadores y la potencia para elevar el material si el sistema es inclinado. Cada una de estas potencias se puede calcular independientemente, y según sea el caso, se adicionan. Las fórmulas que se han sugerido son:

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

Para el transportador vacío:

$$HP = \frac{F(L+L_0)(0.06Wv)}{270}$$

Para el transporte de materiales en horizontal:

$$HP = \frac{F(L+L_0)T}{270}$$

Para elevación de materiales a cierta altura:

$$HP = \frac{TH}{270}$$

Potencia para el volteador:

$$HP = Yv + HT$$

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

En las ecuaciones anteriores *HP* es la potencia consumida en caballos de fuerza, *F* es el coeficiente de frotamiento (0.05 cojinetes ordinarios, 0.03 cojinetes de rodillo), *L* es la longitud del transportador en metros, *L₀* es una constante (30.5 cojinetes ordinarios, 45.7 cojinetes de rodillo), *v* es la velocidad en m/min, *H* es la altura de subida del material en metros, *W* es el peso en kilogramos de las piezas móviles por metro de distancia de centro a centro de las poleas terminales, *T* es la carga del material en ton/h y *Y, Z* son constantes. La potencia necesaria para los descargadores móviles también se puede encontrar en forma tabulada. La siguiente tabla proporciona algunos valores típicos

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

Ancho de la banda (cm)	Potencia para descargador móvil (HP)	
	Cojinetes ordinarios	Cojinetes de rodillos
30.5	0.75	0.50
35.6	1.00	0.75
40.6	1.00	0.75
45.7	1.50	1.25
50.8	1.50	1.25
61.0	1.75	1.25
76.2	2.50	1.75
91.4	3.00	2.50
106.7	4.00	3.00
122.0	5.00	3.25
137.0	6.00	5.00
152.4	7.00	6.00

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

Antes de iniciar operaciones, debe darse a la banda una cierta tensión inicial para impedir su deslizamiento sobre las poleas. Cuando el transportador está cargado, dicho transportador en movimiento está sometido a una tensión compuesta de una tensión inicial y una tensión equivalente a la potencia consumida. La segunda tensión puede considerarse como una tensión neta y la suma de las dos como una tensión total. La tensión inicial es función del tipo de arrastre. La tensión neta sobre la correa se puede calcular como la relación entre la potencia suministrada en kg-m/min y la velocidad de la banda en m/min

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

Un cociente de transmisión de tensiones puede definirse como la relación entre la tensión total y la tensión neta. Dicho cociente se conoce también como la relación de transmisión. Puede encontrarse la tensión total sobre la banda, conocida la tensión neta y esta relación. De la tensión total y del ancho de la banda se conocerá la tensión por metro de ancho de la banda. De esta tensión y de la tensión de seguridad de trabajo por metro y por capa se deduce el número de capas necesarias para que la banda soporte la tensión. Las siguientes tablas presentan un resumen de estos criterios

Transportadores de Banda: Cálculos de Potencia

Relación de Transmisión de Poleas

Tipo de Arrastre	Relación de Transmisión
Polea única desnuda	1.875
Polea única recubierta	1.500
Tándem de poleas desnudas	1.250
Tándem de poleas recubiertas	1.125

Espesor Adecuado de la Banda

Ancho de la Banda (cm)	Número de Capas
30.5	3-4
45.7	3-5
61.0	4-7
76.2	5-8
91.4	6-9
106.7	6-10
122.0	7-12

Transportadores de Banda: Diseños Alternativos



Transportadores de Cadena

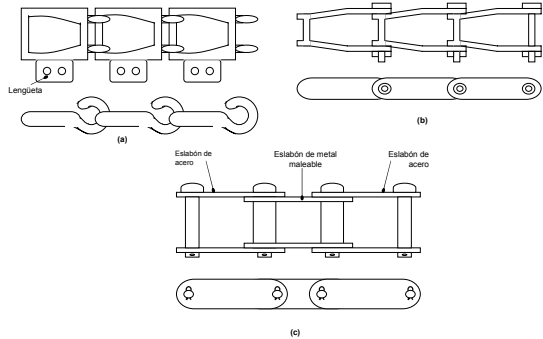
- Transportadores de paletas y rasquetas
 - Transportadores de mandil
 - Transportadores rascadores
- Elevadores de cangilones
 - Horizontales
 - Inclinados

Transportadores de Cadena: Paletas y Rasquetas

Componentes del transportador

- Eslabones
- Cadenas
- Elementos motrices: paletas
- Sistema de potencia
- Elementos del montaje: ductos, canales, etc.

Transportadores de Paletas: Eslabones de Cadenas

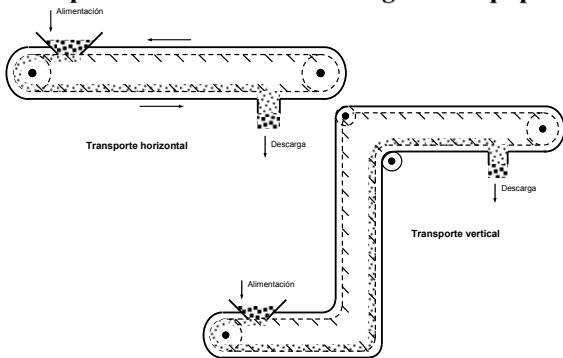


Eslabones de transportadores de cadena: (a) metal maleable adaptado con ménsula, (b) acero, (c) combinado

Transportadores de Paletas: Detalle de Montaje



Transportadores de Paletas: Arreglos de Equipos



Transportadores de Paletas: Capacidad y Potencia

Las variables principales para la selección y el diseño de los transportadores de paletas son la capacidad y la potencia. La capacidad de un transportador de paletas horizontal, trabajando con material de aproximadamente 800 kg/m³, ha sido calculada y se presenta en la siguiente tabla

Tamaño de las Paletas (cm)	Peso por Paleta (kg)
10 x 25.4	6.80
10 x 30.5	8.62
12.7 x 30.5	10.43
12.7 x 38.1	14.06
15.24 x 45.7	18.14
20.30 x 45.7	27.21
20.30 x 50.8	31.75
20.30 x 61.0	40.82
25.40 x 61.0	52.16

*Para materiales que pesen aproximadamente 800 kg/m³ y trasladados a velocidad de 30 m/min, aproximados
 **Trabajando con otros materiales la capacidad es proporcional al peso del m³ del material
 *Un transportador inclinado tiene el siguiente porcentaje de capacidad correspondiente al horizontal:

Grado de inclinación	Capacidad del horizontal (%)
20	77
30	55
40	33

Transportadores de Paletas: Capacidad y Potencia

La potencia, definida como el esfuerzo de tracción de la cadena para transportadores horizontales viene dada por:

$$P = 2WLF + W_1LF_1$$

donde P es el esfuerzo de tracción en kg-f, W es el peso del transportador en kg/m, L es la longitud del transportador en metros, W_1 es el peso del material transportado en kg/m, F es el coeficiente de fricción para la cadena y F_1 es el coeficiente de fricción entre el material y el ducto. F tiene un valor de 0.33 para metal sobre metal y de 0.60 para metal sobre madera

Para cadenas de rodillos F se calcula de la siguiente expresión:

$$F = X + \frac{d}{D} + \frac{2Y}{D}$$

donde X es una constante (0.33 metal sobre metal no engrasado, 0.20 metal sobre metal engrasado), d es el diámetro del eje en el que gira el rodillo, D es el diámetro exterior de los rodillos e Y es una constante (0.03). La siguiente da varios valores de F_1 para diversos materiales sobre metal

Para transportadores inclinados, la potencia se puede calcular a partir de la expresión:

$$P = WL(F \cos \alpha + \text{sen} \alpha) + W_1L(F_1 \cos \alpha + \text{sen} \alpha) + WL(F \cos \alpha - \text{sen} \alpha)$$

donde todos los términos ya han sido definidos y α es el ángulo de inclinación

Transportadores de Paletas: Capacidad y Potencia

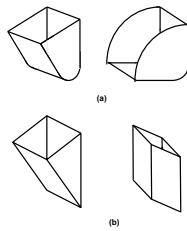
Material	F_1
Carbón bituminoso	0.590
Antracita	0.330
Coke	0.355
Cenizas húmedas	0.530
Arena seca	0.600
Piedra caliza	0.585

Transps. Cadena: Elevadores de Cangilones

Componentes del transportador

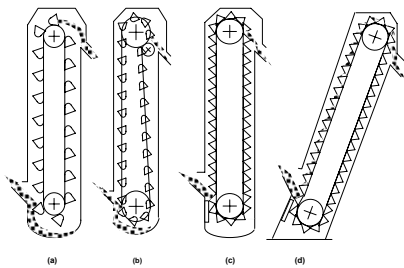
- Cadenas
- Coronas dentadas
- Cangilones o cucharones
- Cajón o artesa de carga
- Elementos motrices, implementos, etc.

Elevadores de Cangilones: Cangilones



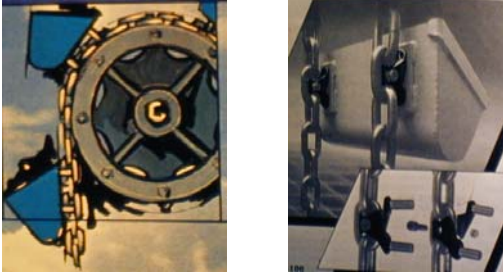
Cangilones: (a) de metal maleable, (b) de acero

Elevadores de Cangilones: Diseños de Elevadores



Elevadores de cangilones: (a) de cangilón espaciado y descarga centrífuga, (b) de cangilón espaciado y descarga positiva, (c) de cangilón continuo, (d) de cangilón continuo y gran capacidad

Elevadores de Cangilones: Detalle de Montaje



Elevadores de Cangilones: Capacidad y Potencia

Los principales criterios de diseño y selección son el tipo de material y la capacidad, así como la potencia. Esta última se calcula fácilmente a partir de la siguientes fórmulas:

Para cangilones espaciados:

$$HP = \frac{TH}{152}$$

Para cangilones continuos:

$$HP = \frac{TH}{167}$$

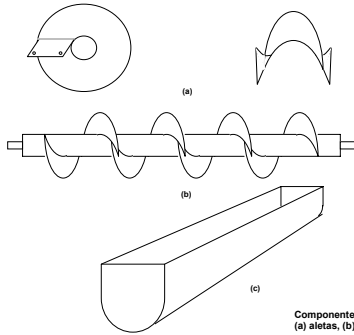
donde *HP* es la potencia en caballos de fuerza, *T* es el peso del material en ton/h y *H* es la altura en metros

Transportadores de Tornillo

Componentes

- Hélice de metal o plástico
- Eje
- Artesa o recipiente en forma de *U*
- Soportes del eje
- Elemento motriz y aditamentos

Transportadores de Tornillo: Componentes



Componentes de transportador de tornillo:
(a) aletas, (b) tornillo, (c) artesa

Transportadores de Tornillo: Montaje



Transportadores de Tornillo: Selección y Diseño

La potencia del transportador puede calcularse por la relación:

$$HP = \frac{CL\rho_b F}{4500}$$

donde *HP* es la potencia en caballos de fuerza, *C* es la capacidad en m³/min, *L* es la longitud en metros, ρ_b es la densidad aparente del material en kg/m³ y *F* es un factor del material que se reporta en tablas. Al aplicar la ecuación de arriba, si la solución es de 2 caballos o menos se multiplica por 2, y si está comprendida entre 2 y 4 se multiplica por 1.5. La siguiente tabla muestra valores del factor *F* para materiales diversos

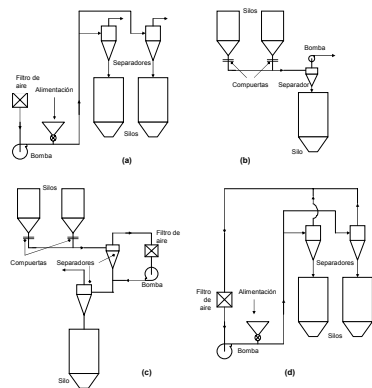
Transportadores de Fase Diluida

Sistemas

- **Presión:** El material se transporta en una corriente de aire sobre la presión atmosférica y se separa por un filtro de aire o ciclón para llegar a su destino final.
- **Vacío:** Una de las principales ventajas es que no se necesita ningún tipo de alimentador para que el material pase a la línea de transporte. Un ciclón o filtro separa el material antes de llegar a su destino.
- **Presión-vacío:** Está dispuesto de tal manera que el vacío se usa para introducir el material al transportador y moverlo una distancia corta hasta un separador. El aire pasa a través de un filtro y luego por el lado de succión de un abanico de desplazamiento positivo.
- **Cerrado:** Se recircula el aire, reduciendo contaminación del producto por el aire y limitando la deshidratación de ciertos materiales.

Sistemas de transporte neumático de fase diluida:

- (a) de presión
- (b) de vacío
- (c) de presión-vacío
- (d) cerrado



Transportadores de Fase Diluida:

Selección y Diseño

Velocidad de Saltación

La velocidad de saltación se define como la velocidad de aire requerida para suspender, fluidizar, y prevenir la precipitación de un material sólido granular de un tamaño, forma y densidad en particular

Selección y Diseño

Para el cálculo de la velocidad de saltación se determina un parámetro relacionado al diámetro de partícula x_p^* por medio de la siguiente ecuación. En caso de presentarse un rango amplio de tamaños, se calcula x_p^* para las partículas más grandes y más pequeña

$$x_p^* = \frac{x_p}{\left[\frac{3(\mu_g)^2}{4g\rho_g(\rho_s - \rho_g)} \right]^{1/3}}$$

donde: x_p es el diámetro de la partícula, μ_g es la viscosidad del gas, g es la aceleración de la gravedad, ρ_g y ρ_s las densidades del gas y sólido respectivamente

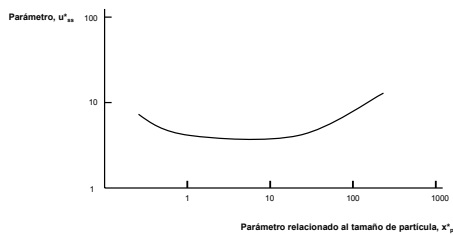
Selección y Diseño

Por medio de gráficas de diseño, como la mostrada en la figura de la siguiente diapositiva, se calcula el parámetro relacionado a la velocidad de saltación u_{ss} y a partir de este se obtiene la mínima velocidad de transporte para una partícula sencilla por medio de la siguiente relación:

$$u_{ss} = 0.19(u_{ss}^*) \left[\frac{4g\mu_g(\rho_s - \rho_g)}{3(\rho_g)^2} \right]^{1/3} (D_t)^{0.4}$$

donde D_t es el diámetro de la tubería en mm, pero se toma como valor absoluto para el análisis dimensional

Selección y Diseño



Velocidad mínima de transporte para una partícula simple en una tubería de 63.5 mm de diámetro

Selección y Diseño

Se calcula enseguida la pendiente de la curva n correspondiente al valor de x_p^* . Para sólidos de amplio rango de tamaños, n es la pendiente de la línea que une los valores de u_{ss}^* para las partículas menor y mayor. Finalmente se calcula la velocidad de saltación u_s de la siguiente ecuación:

$$\frac{G_s}{\rho_s} = \frac{0.214(n)^{1.5}(u_s - u_{ss})}{u_{ss}}$$

para $n > 0.068$. Así como:

Selección y Diseño

$$\frac{G_s}{\rho_s} = \frac{0.0032(u_s - u_{ss})}{u_{ss}}$$

para: $-0.11 < n < 0.068$

donde G_s es la velocidad másica de sólidos ($\text{kg/m}^2\text{s}$) si la velocidad lineal u está expresada en m/s

La velocidad equivalente a la de saltación, para el caso de tuberías verticales, se conoce como la velocidad de estrangulación o ahogamiento, y para partículas de tamaño específico es aproximadamente igual a la velocidad de saltación. Para una mezcla de partículas de diversos tamaños la velocidad de estrangulación equivale aproximadamente a la cuarta parte de la velocidad de saltación

Selección y Diseño

Por lo que respecta a la caída de presión a través del sistema, se determina calculando los cambios de energías potencial, cinética y de fricción en las secciones horizontal y vertical, así como en los codos separadamente, a lo largo de todo el trayecto de transporte. La magnitud de la caída de presión determinará el suministro de energía, por lo que repercute directamente en costos y selección de equipos.

Se pretende que los sistemas operen a la mínima velocidad posible, tan cerca de la velocidad de saltación como las variables de operación lo permitan, para minimizar desgaste, consumos de potencia y costos

Selección y Diseño

En las secciones horizontales la pérdida de energía potencial es cero. La ganancia en energía cinética E_c es dada por:

$$E_k = G_s u_p$$

donde u_p es la velocidad de la partícula

Si la partícula se ha acelerado a su valor máximo:

$$u_p = u_0 - u_t$$

donde u_0 es la velocidad del aire y u_t es la velocidad terminal, la cual depende en el régimen de flujo, siendo representada por las siguientes relaciones:

Selección y Diseño

$$u_t = \frac{x_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{18 \mu_g}$$

para $Re_p < 0.4$,

$$u_t = \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu_g} \right]^{1/3} (x_p)$$

para $0.4 < Re_p < 500$, y finalmente:

$$u_t = \left[\frac{3.1 x_p (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_g} \right]^{1/2}$$

para $500 < Re_p < 2 \times 10^5$

Selección y Diseño

En las ecuaciones anteriores Re_p representa al número de Reynolds de partícula, o sea $Re_p = (x_p u_p \rho_g) / \mu_g$. Todas las variables han sido ya definidas

La pérdida de energía por fricción debida al flujo de gas E_{fg} es dada por la ecuación:

$$E_{fg} = \frac{2f_g \rho_g u_0^2 L}{D}$$

donde L es la longitud de la sección y f_g es el factor de fricción. La variable f_g depende una vez más de un número de Reynolds, y las siguientes ecuaciones pueden utilizarse:

Selección y Diseño

$$f_g = 0.0791(\text{Re})^{-0.25}$$

para $3 \times 10^3 < \text{Re} < 10^5$, y:

$$f_g = 0.0008 + 0.0552(\text{Re})^{-0.237}$$

para $10^5 < \text{Re} < 10^8$

Para las ecuaciones anteriores, el número de Reynolds se refiere al sistema. En otras palabras: $\text{Re} = (D_t u_0 \rho_g) / \mu_g$

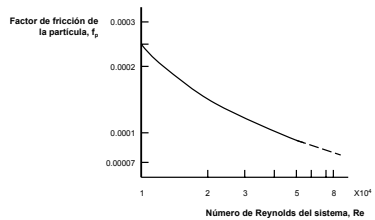
Selección y Diseño

La energía pérdida por fricción debida al flujo de la partícula E_{fp} puede estimarse por:

$$E_{fp} = \left(\frac{\pi}{8} \right) \left(\frac{f_p}{f_g} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{1/2} \left(\frac{G_s}{G} \right) E_{fg}$$

donde G es la velocidad másica del gas y el factor de fricción de la partícula f_p puede determinarse gráficamente a partir de diagramas, como el mostrado en la siguiente figura

Selección y Diseño



Factor de fricción de la partícula en función del número de Reynolds del sistema

Selección y Diseño

Para las secciones verticales no hay cambio en la energía cinética, las pérdidas por energía de fricción se calculan como en el caso de secciones verticales, mientras que la ganancia en energía potencial E_p se puede calcular por:

$$E_p = \left(\frac{G_s}{G} \right) \left(\frac{u_0}{u_p} \right) \rho_s g h$$

La energía pérdida por fricción debida al flujo de la partícula E_{fp} puede estimarse por:

$$E_{fb} = 2f_b \left(\frac{G_s}{G} \right) \left(\frac{u_0^3}{u_p} \right) \rho_g$$

donde $f_b = 0.375, 0.188$ ó 0.125 para relaciones radio del codo/diámetro de tubería de 2, 4 ó 6 ó más respectivamente

Selección y Diseño

La suma de todas las energías previamente descritas que apliquen para un sistema en particular dará la caída total de presión del sistema.

Una alternativa práctica de obtener un diseño preliminar es por el uso de un conjunto de nomogramas, como los presentados en el Manual del Ingeniero Químico. Por medio de estos, el tamaño y la potencia aproximada de un sistema para una densidad dada de material, pueden obtenerse

Procesamiento de Polvos y Particulados

Algunas de la operaciones de procesamiento de polvos y sistemas granulados alimenticios son las siguientes:

- Reducción de tamaño
- Aumento de tamaño
- Recubrimiento
- Mezclado
- Técnicas de separación

Reducción de Tamaño

Los principios teóricos de la molienda son los mismos para diferentes procesos industriales, aunque algunas consideraciones especiales deben tomarse cuando se procesan materiales alimenticios. La molienda en general involucra fuerzas de compresión, impacto y fricción muy intensivas, por lo que una buena parte de la energía involucrada en el proceso se disipa en forma de calor, vibración y ruido. Debido a la sensibilidad que los materiales biológicos poseen, en la molienda de sólidos particulados alimenticios se deben tomar cuidados especiales para evitar daños a los materiales procesados

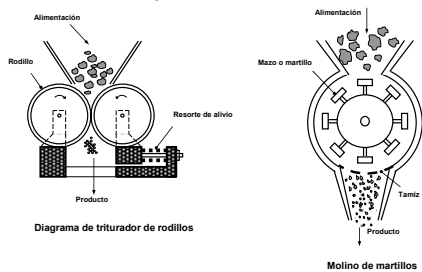
Reducción de Tamaño

Equipos comunmente usados en reducción de tamaño de sólidos granulados alimenticios

Rango de Reducción	Nombre Genérico del Equipo	Tipo de Equipo
Gruesa e intermedia	Trituradores	Trituradores de rodillo
Intermedia y fina	Molinos	Molinos de martillos Molinos de disco Molinos tubulares (de bolas)
Fina y ultrafina	Pulverizadores	Molinos de martillos Molinos tubulares (de bolas)

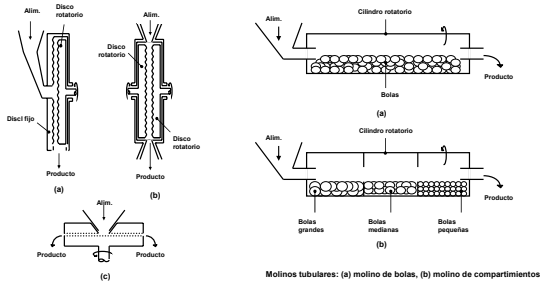
Reducción de Tamaño

Equipos comúnmente usados en reducción de tamaño de sólidos granulados alimenticios



Reducción de Tamaño

Equipos comúnmente usados en reducción de tamaño de sólidos granulados alimenticios



Molinos de disco: (a) molino de disco sencillo, (b) Molino de disco doble (c) Molino Buhr

Molinos tubulares: (a) molino de bolas, (b) molino de compartimientos

Reducción de Tamaño Aplicaciones

La reducción de tamaño es, sin duda, una operación de gran relevancia en la industria alimentaria. Diferentes tipos de molienda se utilizan para aplicaciones tan diversas como molienda de cereales, pulverización de azúcar, de especias y de vegetales secos, trituración de granos de cacao, desgerminado de maíz, producción de harina de pescado, manufactura de chocolate, etc.

Aumento de Tamaño Introducción

Los operaciones de aumento de tamaño se utilizan en la industria alimentaria con diversos fines, tales como optimizar el manejo y capacidad de fluir de materiales granulados, reducir mermas por exceso de finos en ciertos productos, producir formas específicas, mejorar la apariencia, etc. Las operaciones de aumento de tamaño se denominan de diferentes formas e incluyen términos como compactación, pastillado, granulado y extrusión

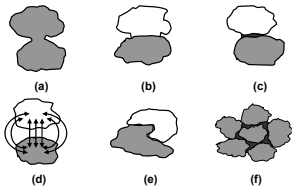
Aumento de Tamaño

Introducción

Independientemente de la diversidad de términos mencionados, en procesamiento de alimentos se presentan dos operaciones importantes de aumento de tamaño: la aglomeración (por tambaleo), que tiene como objetivo controlar la densidad a granel y la porosidad de materiales alimenticios para mejorar propiedades funcionales como la solubilidad, y la compactación (por presión), en la que se busca obtener formas específicas como tabletas y comprimidos

Fundamentos de Aglomeración por Tambaleo

Fuerza de los Aglomerados



Diferentes mecanismos de unión: (a) fusión parcial por temperatura, (b) endurecimiento por reacción química, (c) formación de puentes líquidos, (d) fuerzas de tipo intermolecular, (e) entrelazado mecánico, (f) fuerzas capilares

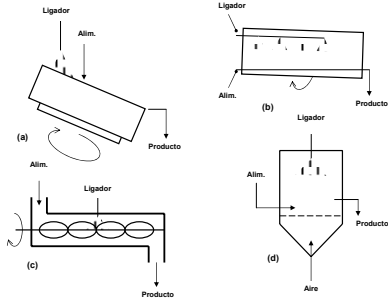
Fundamentos de Aglomeración por Tambaleo

Fuerza de los Aglomerados

El número de sitios de interacción de cada partícula dentro de la estructura del aglomerado se conoce como el número de coordinación. Las partículas en un aglomerado pueden ser numerosas, por lo que una estimación del número de coordinación puede dificultarse. Se pueden efectuar mediciones indirectas del número de coordinación en función de otras propiedades del aglomerado. Idealmente, en aglomerados regulares de partículas monodimensionadas, el número de coordinación k y la porosidad ε se relacionan por:

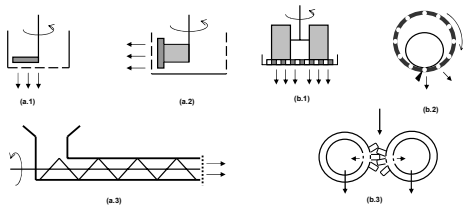
$$k\varepsilon \approx \pi$$

Métodos de Aglomeración



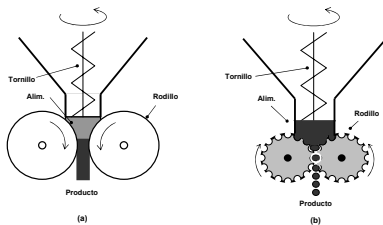
Equipo para aglomeración por tambaleo: (a) disco inclinado rotatorio, (b) tambor inclinado rotatorio, (c) mezclador de listón para polvos (d) lecho fluidizado

Métodos de Compresión



Equipo usado para compactación de (a) presión baja y (b) presión media: (a.1) extrusor de tamiz, (a.2) extrusor de canasía, (a.3) extrusor de tornillo de dado cilíndrico, (b.1) extrusor de dado plano, (b.2) extrusor de dado cilíndrico, (b.3) extrusor de dientes entrelazados

Métodos de Compresión

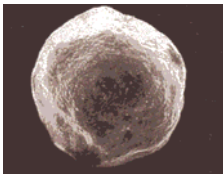


Equipo usado para compactación a alta presión: (a) prensa de rodillo liso, (b) prensa de rodillo estampado

Aumento de Tamaño

Aplicaciones

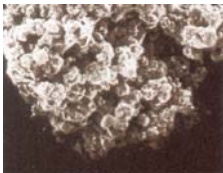
La aglomeración y el compactado tienen numerosas aplicaciones en la industria alimentaria. Para optimizar propiedades funcionales, la aglomeración por tambaleo se utiliza para mejorar la rehidratación y reconstitución de productos diversos como chocolate instantáneo, café soluble, leche deshidratada, edulcorantes, bebidas refrescantes en polvo, caldos y consomés, etc. En lo concerniente a compactados, la extrusión se ha constituido como una operación muy recurrida para obtener una amplia gama de productos desde barras de granos y frutas hasta cereales para desayuno



Recubrimiento

Introducción

Las técnicas de recubrimiento en procesamiento de alimentos se utilizan para proteger granulados alimenticios del oxígeno y la humedad, para controlar la liberación de ingredientes activos y para mejorar la calidad



Recubrimiento: Lecho Fluidizado

En recubrimiento por tambaleo, la fricción excesiva puede causar atrición o desgaste de la cobertura justamente aplicada. Una alternativa de recubrimiento, en el que la atrición no representaría un problema severo, es el uso de técnicas de lecho fluidizado. Los lechos fluidizados se utilizan ampliamente en la industria farmacéutica para secado, granulado y recubrimiento, y recientemente se han adaptado a procesamiento de alimentos para aplicaciones similares. En la industria alimentaria las coberturas pueden emplearse para incrementar, temporizar o ajustar los efectos de ingredientes funcionales y aditivos

Recubrimiento: Lecho Fluidizado

La técnica de lecho fluidizado para recubrimiento de particulados alimenticios, debe promover la formación de una capa uniforme, lo cual depende básicamente de la uniformidad y homogeneidad de las gotas del atomizado. Durante el proceso de atomizado y suspensión de las partículas, una serie de fenómenos de formación de gotas, contacto, coalescencia y evaporación, ocurren casi simultáneamente. Las toberas típicamente usadas para formar el atomizado son del tipo neumático, en las que el líquido se suministra a una baja presión para ser transformadas en rocío, debido al choque con un torrente de aire. Los sistemas neumáticos producen gotas de tamaño relativamente uniforme, que representa una ventaja para su fijación superficial, también uniforme, sobre los particulados

Tipos de Lecho Fluidizado

Entre los diseños disponibles de lechos fluidizados se pueden citar al lecho de atomizado superior, el lecho de atomizado inferior y el lecho de atomizado tangencial

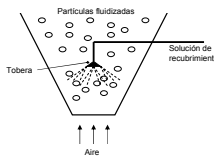


Diagrama de equipo con atomizado superior

Tipos de Lecho Fluidizado

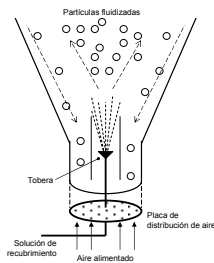


Diagrama de equipo de atomizado inferior (fluidizador Wurster)

Tipos de Lecho Fluidizado

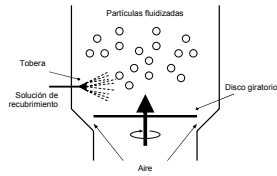


Diagrama de equipo de atomización tangencial con rotor

Recubrimiento

Aplicaciones

El recubrimiento por lecho fluidizado se puede emplear para aplicar capas, tanto saladas como dulces, a diferentes productos alimenticios como cereales para desayuno del tipo del trigo inflado, botanas saladas como nueces y almendras, confitados diversos como gomitas y caramelos, etc.

Mezclado

La operación unitaria en la que se contactan y combinan dos o más materiales para formar un nuevo sistema de propiedades únicas, se ha utilizado por mucho tiempo en procesos industriales diversos. El mezclado se utiliza en la industria alimentaria con el propósito de obtener características uniformes y homogéneas de color, sabor, textura, etc. Desde que los componentes ha mezclarse pueden existir en cualquier estado de la materia, todas las combinaciones posibles (líquido con líquido, líquido con sólido, etc.) pueden darse en la práctica

Mezclado

El mezclado de sólidos secos se encuentra en un nivel de desarrollo y entendimiento mucho más bajo que el mezclado donde participan fluidos, principalmente líquidos. Los modelos de descripción de procesos son muy empíricos aún, y la necesidad de investigación básica en esta área se orienta fundamentalmente a la innovación de equipos para polvos alimenticios. Los procesos de mezclado son mucho más difíciles de definir para el caso de mezclado de polvos, que para el equivalente de mezclado de cualquier tipo de fluidos, pero algunas medidas cuantitativas del mezclado de sólidos secos pueden utilizarse para evaluar el desempeño de equipos

Mezclado

Mecanismo de Mezclado: Segregación

Comparado con el mezclado de fluidos, en el que la difusión puede considerarse espontánea, los sistemas de partículas sólo se mezclarán como resultado de agitación mecánica que proporcionará las condiciones para que las partículas intercambien de posición en forma individual o colectiva. El movimiento de las partículas en una operación de mezclado puede, bajo ciertas condiciones, propiciar sin embargo el efecto opuesto al mezclado conocido como segregación o desmezclado

Mezclado

Mecanismo de Mezclado: Segregación

La segregación en las operaciones de mezclado debe detectarse oportunamente para tomar medidas correctivas oportunas. Una prueba rápida y eficiente para identificar segregación en una operación dada se conoce como "prueba del montón". Una fracción de sólidos mezclados tomados del proceso se pasa a través de un embudo, para formar una pila cónica debajo de éste. Se extraen muestras de la parte central y de la parte extrema de la pila y se analizan sus composiciones. Si estas difieren considerablemente, entonces la segregación sería un problema presente

Mezclado

Índices de Mezclado: Enfoque Estadístico

Una mezcla de sólidos perfecta se pudiera identificar como aquella en que los componentes diferentes originalmente combinados se encontrarán distribuidos perfectamente al azar. En una mezcla de este tipo, la probabilidad de seleccionar un partícula de cualquier constituyente diferente, sería la misma en cualquier punto de una muestra. Una herramienta que puede utilizarse para definir los grados de probabilidad mencionados, y verificar que tanto varían de componente a componente, se puede tomar precisamente de la disciplina de Probabilidad dentro de la Estadística

Mezclado

Índices de Mezclado: Enfoque Estadístico

Si se toman muestras puntuales al azar de una mezcla de partículas sólidas, la desviación estándar s del valor promedio de una fracción específica de la muestra se pudiera estimar por la siguiente relación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

donde x_i es cada valor medido de la fracción de un polvo y N es el número de muestras de la mezcla analizadas

Mezclado

Índices de Mezclado: Enfoque Estadístico

La desviación estándar absoluta no tiene sentido, al menos que se compare contra un patrón de valores extremos de segregación completa s_0 o mezclado perfecto s_r . Un índice de mezclado M_1 bajo estos criterios puede definirse como sigue:

$$M_1 = \frac{s_0^2 - s^2}{s_0^2 - s_r^2}$$

En la práctica, los valores de s , aún para una mezcla pobre, se aproximan más al valor de s_r que al de s_0 , por lo que un índice alternativo M_2 se sugiere de acuerdo a:

$$M_2 = \frac{s}{s_r}$$

Mezclado

Índices de Mezclado: Enfoque Estadístico

La ecuación anterior indicaría que para un mezclado eficiente M2 debería tender a la unidad. Los valores de s_r y s_s pueden determinarse teóricamente, ya que se conocen las fracciones originales de los polvos mezclados. Para una mezcla de dos componentes, una expresión sencilla que nos define la fracción ideal de uno de los componentes sería la siguiente:

$$s_r = \sqrt{\frac{X_A(1-X_A)}{n}}$$

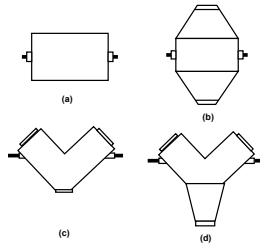
donde X_A representa la fracción de uno de los componentes y n es el número de partículas de la muestra

Puede demostrarse que las ecuaciones presentadas pueden combinarse para derivar la siguiente expresión del tiempo óptimo de mezclado t :

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1 - 1/\sqrt{n}}{1 - 1/M_2}$$

Mezclado

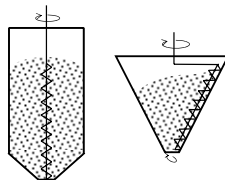
Equipos: Mezcladores de Tambaleo



Mezcladores de tambaleo: (a) de cilindro horizontal, (b) mezclador oblicuo, (c) tipo "V", (d) tipo "Y"

Mezclado

Equipos: Mezcladores de Tornillo



Mezcladores de tornillo vertical: (a) de tornillo central, (b) de tornillo orbitante

Mezclado

Aplicaciones

Las aplicaciones del mezclado de polvos en procesamiento de alimentos son diversas y variadas e incluyen mezclado de granos previo a molienda, mezclado e incorporación de ingredientes en harinas, preparación de formulaciones de pudines y mixturas de repostería, preparaciones de formulaciones para bebidas instantáneas diversas, incorporación de ingredientes y aditivos en productos deshidratados, etc.

Técnicas de Separación en Seco

Ciclones

En la industria alimentaria se presentan casos en los que se requieren separar sólidos finamente divididos de un torrente de gas, generalmente de aire. Los sólidos en cuestión pueden ser contaminantes liberados al ambiente, como en el caso de procesos de molienda de cereales, o pueden ser sólidos que voluntariamente se suspendieron en un gas, como en el caso de transporte neumático de polvos finos. Un dispositivo simple de diseño y operación y de gran eficiencia para llevar a cabo separaciones sólido-gas es el ciclón de gas o simplemente ciclón

Ciclones

Introducción

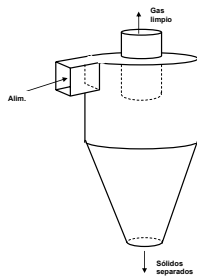


Diagrama esquemático de un ciclón

Ciclones

Aspectos Teóricos

Un ciclón es un dispositivo de asentamiento en el que una fuerza centrífuga, actuando radialmente, sustituye al efecto de la fuerza gravitacional que actúa verticalmente, con el objetivo de acelerar la sedimentación de las partículas de un sólido en el seno de un gas (aire). Las partículas estables en torres de aire son extremadamente finas, por lo que su asentamiento sería descrito por la ley de Stokes, cuya expresión simple es:

$$u_t = \frac{x^2(\rho_s - \rho_g)g}{18\mu_g}$$

donde u_t es la velocidad terminal de asentamiento, x es el diámetro de la partícula, ρ_s es la densidad del sólido ρ_g es la densidad del gas y μ_g es la viscosidad del gas

Ciclones

Aspectos Teóricos

Los ciclones pueden generar fuerzas centrífugas que incrementan la fuerza gravitacional entre 5 y 2500 veces, dependiendo del diámetro de la unidad. Cuando las partículas entran al cuerpo del ciclón alcanzan rápidamente sus velocidades terminales, relativas a sus tamaños y posiciones dentro de éste. La aceleración radial en un ciclón depende del radio del trayecto que sigue el gas y se define por la ecuación:

$$g = \omega^2 r$$

donde ω es la velocidad angular y r es el radio

Bajo ciertas suposiciones, una expresión de la velocidad terminal v_t de la partícula por efecto del campo centrífugo generado en el ciclón es:

$$v_t = \left[\frac{x^2(\rho_s - \rho_g)g}{18\mu_g} \right] \frac{v_{tm}^2}{gr} = (u_t) \frac{v_{tm}^2}{gr}$$

Ciclones

Aspectos Teóricos

Para un tamaño dado de partícula, la velocidad terminal es máxima en el vórtice interno, donde r es pequeño, así que las partículas separadas del torrente gaseoso se eliminan en este vórtice interno y pueden pasar al vórtice externo para alcanzar la pared del ciclón y ser separadas por la parte inferior del mismo. Las partículas muy finas, que no tienen tiempo de llegar a la pared, son acarreadas por inercia en el vórtice interno y no alcanzan a ser separadas del torrente del gas.

Ciclones

Aspectos Teóricos

Los ciclones pueden diseñarse esperando que no haya partículas que sean acarreadas por el torrente de gas "limpio" pero esto no siempre es posible. En la práctica, cualquier polvo posee una distribución de tamaños, cuyo tamaño mediano divide a tal distribución entre "finos" y "gruesos". El tamaño mediano, para fines prácticos, se puede hacer coincidir con el llamado "punto de corte", que define al tamaño límite posible de ser separado

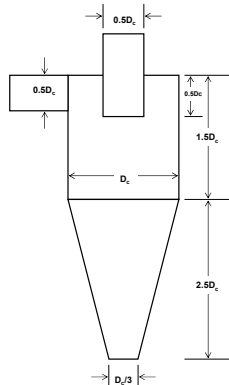
Ciclones

Teoría: Escalamiento Adimensional

La experiencia ha demostrado que existen una serie de relaciones geométricas que deben conservarse entre diversos diseños de ciclones, para que la eficiencia de separación se mantenga en función de la capacidad. Se acostumbra relacionar tales variables de diseño al diámetro del ciclón D_c y proponer ciclones "estándar" que son probados y proporcionan eficiencias razonables para un rango dado de condiciones. Un ciclón estándar que proporciona condiciones óptimas de separación se conoce como diseño *Stairman*. Utilizando un diseño estándar de ciclón se facilitan los cálculos para predecir efectos de variables geométricas y de operación, en la eficiencia y la capacidad de un proceso de separación por ciclones

Ciclones

Dimensiones de un ciclón estándar *Stairmand*



Ciclones

Teoría: Escalamiento Adimensional

Para un mismo régimen de flujo, las velocidades en cualquier parte del caudal dentro de un ciclón son proporcionales a una velocidad característica v , función del diámetro de la parte cilíndrica del ciclón, mientras que las posiciones radiales son proporcionales al diámetro D_c . Bajo estas suposiciones, un grupo dimensional llamado el número de Stokes puede derivarse como:

$$\text{Stk}_{50} = \frac{X_{50}^2 \rho_s v}{18 \mu_g D_c}$$

donde $(X_{50})^2$ es el punto de corte y v es la velocidad característica basada en el área seccional de la parte cilíndrica del ciclón

Ciclones

Teoría: Escalamiento Adimensional

La caída de presión en función del caudal volumétrico se expresa generalmente como $Eu = f(Re)$, donde Euler es el número de Euler y Re el número de Reynolds, y se definen respectivamente por las siguientes relaciones:

$$Eu = \frac{2\Delta P}{\rho_g v^2}$$

$$Re = \frac{D_c v \rho_g}{\mu_g}$$

Ciclones

Teoría: Escalamiento Adimensional

Los grupos adimensionales se encuentran relacionados por funciones específicas, que pueden ser graficadas como se indica en el diagrama

