



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

DESARROLLO TEORICO SOBRE LA CARACTERIZACION DE MATERIALES SOLIDOS EN POLVO Y PROPUESTA METODOLOGICA PARA LA EVALUACION DE LA FLUIDEZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERA EN ALIMENTOS PRESENTA: RAMIREZ CABRERA ANA ROSA

ASESOR: I.B.O. FERNANDO BERISTAIN

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

2000

REGIS CON FALSA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de TESIS:

Desarrollo teórico sobre la caracterización de materiales
sólidos en polvo y propuesta metodológica para la
evaluación de la fluidez

que presenta la pasante: Ramírez Cabrera Ana Rosa
con número de cuenta: 9656646-0 para obtener el TITULO de:
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 4 de junio de 2001

PRESIDENTE	<u>I.B.Q. Fernando Beristain</u>	
VOCAL	<u>I.B.Q. Norma B. Casas Alencaster</u>	
SECRETARIO	<u>Dr. José Luis Arjona Román</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>I.A. Ana Ma. De la Cruz Javier</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>M.en C. Ma. de la Luz Zambrano Zaragoza</u>	

Mi agradecimiento al Todo Poderoso por mi existencia en esta vida y por haberme permitido vivir

A mi mamá por haberme dado la vida, por haberme guiado, impulsado y me ha heredado el amor a la vida, a quien sin escatimar esfuerzo alguno ha sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. A quien la ilusión de su vida ha sido convertirme en persona de provecho. A quien nunca podré pagar todos sus desvelos ni aun con las riquezas más grandes del mundo.

Un especial agradecimiento a usted estimado Profesor Fernando Beristain que con su apoyo concluí este trabajo y veo realizada una de las más grandes metas de mi vida.

A todas las personas que directa o indirectamente hicieron que me formara profesionalmente.

Julio 2001

ÍNDICE

Página

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

OBJETIVO GENERAL

CAPITULO I CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS

1.1 Sólidos simples y parámetros que los describen	1
1.2 Caracterización de partículas	2
1.2.1 Análisis de forma (morfología)	3
1.2.1.1 Partículas de forma regular e irregular	4
1.2.1.2 Caracterización del tamaño de partícula	5
1.2.2 Análisis de distribución del tamaño de partículas	12
1.2.2.1 Métodos de medición de distribución del tamaño de partícula	15
1.2.2.2 Análisis por medio de Tamices	22
- Representación tabular	24
- Representación gráfica	25
- Histogramas de frecuencia	25
- Curvas de frecuencia	26
- Curvas de frecuencia acumulativa	27
1.3 Parámetros Estadísticos	31

CAPITULO II SÓLIDOS PARTICULADOS Y PARÁMETROS QUE LOS DESCRIBEN

2.1 Muestreo de sólidos particulados	34
2.1.1 Muestreo Manual	35
2.1.2 Muestreo Mecánico	36
2.2 Fuerzas particulares actuantes	37

2.3 Clasificación de sólidos particulados en base a su fluidez	39
2.3.1 Clasificación de sólidos particulados en un sistema no-aireado.	40
2.3.1.1 Clasificación en base a la celda de cizalla	40
2.3.1.2 Clasificación en base al espesor	41
2.3.2 Clasificación de polvos en estado aireado (Lecho fluidizado)	43
2.3.3 Clasificación de polvos en base a su comportamiento en transporte neumático.	45
2.4 Almacenamiento de sólidos particulados	48

CAPITULO III CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS PARTICULADOS

3.1 Parámetros aplicables en la caracterización de sólidos particulados	51
3.1.1 Caracterización de fluidez de materiales particulados	51
3.1.2 Ángulo de fricción en la pared	57
3.1.3 Fuerza de cohesión	58
3.2 Definición de propiedades de falla	60
3.3 Circulo Mohr	67
3.4 Propiedades de flujo	72
3.5 Flujo de sólidos a través de orificios	78
3.5.1 Flujo en tolvas de almacenamientos	79
3.6 Tipos de flujo y expresión de la fluidez	81
3.7 Influencia del contenido de humedad y temperatura	90
3.8 Metodología propuesta para la caracterización de sólidos particulados	93
CONCLUSIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE TABLAS

No. De tabla		No. De pág.
1	Esfericidad de diversos materiales.	4
2	Métodos para expresar el tamaño de partículas irregulares.	7
3	Caracterización por medio de círculo inscrito y circunscrito.	10
4	Propiedades de las partículas y de los polvos.	13
5	Ejemplos de métodos de análisis y equipos para determinar el tamaño de partículas.	16
6	Métodos de análisis de distribución de tamaño de partícula.	18
7	Serie de tamices estándar.	23
8	Datos de distribución de tamaños en base a serie Tyler.	24
9	Análisis de tamices.	27
10	Método de permeametría.	29
11	Valores de cohesión para algunos alimentos en polvo.	58
12	Tipos de flujo y expresión de la fluidez.	82
13	Valores de fluidez.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

No. De Figura		No. De Pág.
1	Esquematación de una partícula retenida en la malla de un tamiz.	6
2	Longitud y altura de una partícula.	9
3	Esquematación de una partícula por medio de círculo inscrito y circunscrito.	10
4	Esquematación de una partícula equivalente a un cilindro o una esfera.	11
5	Partículas observadas por medio del microscopio óptico automatizado.	12
6	Curva de un proceso de tamizado según Whitby.	21
7	Histograma de frecuencia.	25
8	Ilustración de una curva de frecuencia.	26
9	Relación entre distribuciones de frecuencia y distribuciones de frecuencia acumulativa.	28
10	Fisher Sub-sieve.	30
11	Flujo de polvo para el muestreo manual.	35
12	Spinning riffler para el muestreo de polvo.	36
13	Modelo de interesferas.	39
14	Representación de la clasificación de Jenike.	41
15	Clasificación en base al espesor.	42
16	Clasificación de Geldart.	45

No. De Figura		No. De Pág.
17	Silo y tolvas más comunes en el almacenamiento y descarga de polvos.	50
18	Celda de cizalla de Jenike	52
19	Procedimiento experimental de la celda de Jenike.	53
20	Línea de fluencia de Jenike	54
21	Derivación de un punto en MFF y un valor de δ .	55
22	Valores de cohesión.	56
23	Líneas de fluencia determinadas experimentalmente.	59
24	Corte del equipo utilizado para la prueba de fricción en la pared.	61
25	Definición de ángulo de fricción en la pared.	62
26	Ángulo efectivo de fricción interna.	63
27	Función de falla.	64
28	Esfuerzo de consolidación principal.	66
29	Círculo Mohr.	67
30	Determinación de esfuerzos para la construcción del círculo Mohr.	68
31	Localización de las líneas correspondientes a los esfuerzos normales.	69

Índice de Figuras

No. De Figura		No. De Pág.
32	Localización de las líneas correspondientes a los esfuerzos de cizalla.	69
33	Representación del diámetro del círculo Mohr.	70
34	Representación del esfuerzo principal máximo.	70
35	Cohesión y último esfuerzo de tensión.	71
36	Ángulos de reposo para diferentes tamices.	74
37	Medición del ángulo de reposo.	76
38	Ángulo de fricción, tubo de prueba.	77
39	Ángulo de fricción, presión en la base de la columna.	78
40	Flujo en tolvas de almacenamiento.	81
41	Dispositivo para la medición de la fluidez.	83
42	Métodos para la medición del ángulo de reposo.	85
43	Equipo para la determinación del torque.	87
44	Relación entre la cohesión y el tiempo de aglomeración masiva (endurecimiento) en sacarosa en polvo.	92
45	Metodología propuesta para la caracterización de sólidos particulados	94

RESUMEN

Un sólido es un cuerpo que ocupa un volumen definido y normalmente tiene forma y firmeza determinadas; un polvo está formado por sólidos particulados que pueden resistir una deformación, pueden fluir y pueden ser comprimidos. Para realizar un análisis de los sólidos particulados, primeramente se debe realizar un muestreo para obtener una muestra representativa del total del polvo; el más recomendable es el muestreo mecánico. Posteriormente un análisis de forma (morfología) para tener una aproximación del diámetro de la partícula, esto puede ser realizado por medio de un tamizado, o de un microscopio; otro parámetro necesario para el análisis es el de tamaño de partícula que también puede ser realizado por un análisis por medio de tamices, apoyándonos de los histogramas de frecuencia, de las curvas de tamizado de frecuencia y curvas de frecuencia acumulativa. Otros métodos son la sedimentación y permeametría y con los datos obtenidos se puede realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos, como el Sauter Medio y la desviación estándar.

La determinación de fuerzas interparticulares es importante porque determinan propiedades físicas como son cohesión y adhesión muy importantes en la caracterización de sólidos particulados.

Para la medición de la fluidez de sólidos particulados se utiliza la celda de Jenike, en esta se aplican dos fuerzas una vertical o esfuerzo normal y una horizontal o esfuerzo de cizalla, los resultados obtenidos de las pruebas son utilizados para producir una gráfica llamada línea de fluencia y si se grafican varias líneas de fluencia, para obtener el comportamiento del polvo. Otras propiedades que nos indican la fluidez de materiales particulados son el ángulo de fricción en la pared y ángulo de fricción interna, la función de falla, cohesión y último esfuerzo de tensión. Si se obtienen ángulos de reposo de 20° por medio de la determinación del ángulo de reposo se entiende que es un sólido que fluye libremente y valores de 60° son sólidos con pocas características de flujo. Todas estas propiedades nos indican las características de fluidez de sólidos particulados.

INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos en polvo ha experimentado una expansión notable debido a las ventajas que ofrece la utilización y el manejo de este tipo de materiales, en lo que respecta al flujo, transporte y almacenamiento.

En la elaboración de alimentos, los productos en polvo pueden cumplir diferentes funciones: materia prima, aditivos, producto intermedio o producto final. Por ejemplo, la leche es el producto final de la planta deshidratadora, pero es, a su vez, materia prima en pastelería; la sémola es un producto final de la molienda del trigo y la materia prima en la producción de pastas. (Peleg, 1984)

Los métodos de preparación de polvos dependen del estado físico y de las propiedades fisicoquímicas del producto original. Los métodos más comunes son la molienda, la deshidratación, la cristalización y la aglomeración.

El manejo adecuado de polvos requiere cierto control de las condiciones ambientales en las que se les mantiene, fundamentalmente humedad y temperatura. Una humedad excesiva en el ambiente da lugar a la absorción de agua por las partículas y a la disolución de componentes solubles; la solución resultante forma, entonces puentes líquidos que, por posterior disminución de la humedad, se convierte en uniones sólidas compuestas, fundamentalmente, del soluto que se disolvió originalmente. Estas uniones pueden causar grave deterioro de la presentación y de las propiedades de flujo del polvo correspondiente. (Moreyra et al., 1991)

Cuanto más tiempo está un polvo bajo condiciones ambientales desfavorables, mayor es la posibilidad de que se originen problemas como los antes mencionados. (Peleg, 1984)

El grado de compactación de los polvos es también un factor muy importante a considerar cuando se manejan grandes volúmenes, como ocurre al almacenar en silos y tolvas industriales. En estos casos, el peso de la masa incrementa la presión y, por lo tanto, el grado de compactación del polvo; esto, a su vez, promueve interacciones físicas entre las partículas, como son fuerzas de fricción, fuerzas de tensión superficial, fuerzas mecánicas, fuerzas electrostáticas y fuerzas de Van der Waals. (Rumpf, 1990). Estas fuerzas pueden afectar las propiedades de flujo de un sólido con polvos finos ($\leq 150 \mu\text{m}$), predominando las fuerzas de fricción y las de Van der Waals. (Fonner, 1990)

El comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y No newtonianos puede ser determinado a través de diversos parámetros como son: la viscosidad y su variación con la temperatura y presión. Pero los polvos y sólidos particulados son diferentes (Rodees, 1990):

- No son sólidos, pero pueden resistir una deformación.
- No son líquidos, pero pueden fluir.
- No son gases, pero pueden ser comprimidos.

La gran variedad en cuanto a la naturaleza y composición química de los diferentes polvos alimentarios da lugar a que su comportamiento, especialmente en lo que se refiere a flujo, dependa de varios factores. Estos factores pueden ser inherentes al polvo mismo, como propiedades de superficie, tamaño de partícula, fuerzas de cohesión, etc o pueden ser factores externos, tales como la temperatura, presión y humedad relativa.

La densidad y compresibilidad de polvos han demostrado ser propiedades sencillas de determinar, pues su magnitud depende de las fuerzas de atracción entre partículas y, por ello, permiten estimar cambios en el valor de cohesión y, por lo tanto en las propiedades de flujo y predisposición a la aglomeración. (Moreyra, et al. 1981)

La evaluación reológica de polvos y sólidos particulados apenas comienza, las pruebas de fluidez realizadas a estos materiales han sido empíricas. Debido a la importancia de conocer las propiedades reológicas e polvos y sólidos particulados, es necesario realizar mediciones que nos permitan obtener datos aproximados de parámetros que puedan ser utilizados posteriormente para la evaluación de la fluidez.

Las propiedades reológicas del conjunto de partículas, deben ser una función de las propiedades individuales de las partículas, (incluyendo la deformación y el flujo), (Richardson, 1990) que son esenciales para describir el comportamiento reológico en el manejo de polvos. (Fayed, 1990)

Algunos métodos más comúnmente usados para la medición de fluidez son:

1. Ángulo de reposo.
2. Fuerzas de cizalla.
3. Medición de propiedades de flujo en tolva.

En este trabajo se realizó una recopilación de información bibliográfica que pretende dar un panorama general para el estudio de la medición de la fluidez de materiales sólidos en polvo, así como algunos métodos para su evaluación.

OBJETIVO GENERAL: Realizar una recopilación bibliográfica que ofrezca un panorama general para el estudio, e investigación de la caracterización de materiales sólidos en polvo.

Objetivos Particulares

Objetivo Particular 1: Investigar los métodos para la obtención de parámetros que describen a las partículas en cuanto a forma y tamaño apoyándose de un análisis por medio de tamices y de parámetros estadísticos.

Objetivo Particular 2: Explicar los métodos para el muestreo de sólidos particulados y las fuerzas particulares actuantes, así como la clasificación de sólidos particulados para el almacenamiento de sólidos particulados.

Objetivo Particular 3: Describir los métodos empleados para la evaluación de la fluidez de sólidos particulados para posteriormente establecer una metodología.

CAPITULO I
CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS

1.1 Sólidos simples y parámetros que los describen.

Para comenzar con el análisis de los sólidos y los parámetros que los describen debemos conocer que es un sólido. Un sólido es definido como un cuerpo que ocupa un volumen definido y normalmente tiene forma y firmeza determinadas, la movilidad de las partículas que lo constituyen es casi nula. (Ocampo, 1990)

Los polvos son generalmente el resultado de la desintegración mecánica de los sólidos y se pueden redispersar por medio de un chorro de aire, un polvo esta compuesto por un conjunto de partículas. (Perry, 1992)

Los materiales sólidos más comunes son de forma granular o son polvos y como ejemplos tenemos en la industria farmacéutica (drogas y excipientes), alimentos (granos, azúcar, harina), materiales de construcción (arena y cemento). La razón principal para el estudio de los sólidos particulados es debido a que sus propiedades físicas influyen en los procesos de producción. Por ejemplo:

- 1) Disolución de la partícula: las partículas más pequeñas se disuelven más rápidamente que las grandes lo que determina el comportamiento en el proceso de manufactura.
- 2) Las propiedades de flujo de los polvos son dependientes del tamaño de partícula y de la forma de la partícula. La mayoría de los polvos necesitan trasladarse de un lugar a otro (por ejemplo del silo de almacenamiento hacia el área de proceso) el control del comportamiento de flujo es muy importante. Generalmente las partículas gruesas aproximadamente esféricas fluyen más fácilmente que las partículas pequeñas o largas.
- 3) La estabilidad de dispersiones, como suspensiones y emulsiones depende del tamaño del material dispersado. Las fuerzas entre partículas coloidales dependen de sus dimensiones de su tamaño y densidad.

En general durante un proceso, los sólidos son más difíciles de manejar que los líquidos, vapores, o gases: los sólidos aparecen en formas variadas como pedazos angulares grandes, hojas continuas, polvos finamente divididos, etc (Washington, 1992)

En el siguiente esquema se ilustran algunos de los parámetros físicos que describen a los sólidos particulados.



Entre las características más importantes de las partículas de polvos se encuentran: distribución de tamaño, aglomeración, estado de agregación, color, densidad, dureza, estado magnético, punto de fusión, porosidad, índice de refracción, solubilidad, área superficial.

1.2 Caracterización de partículas.

Una partícula es un objeto pequeño que tiene límites físicos precisos en todas direcciones.

Las partículas sólidas individuales se caracterizan por su tamaño, forma, y densidad. Las partículas obtenidas por separación de un sólido, tienen varias densidades, normalmente diferente de la densidad del material conglomerado.

Tamaño y forma se especifican fácilmente para las partículas regulares, como esferas y cubos, pero para partículas irregulares los términos "tamaño" y "forma" no son tan claros y deben definirse arbitrariamente. (Rhodes, 1990)

1.2.1 Análisis De Forma (Morfología)

La forma es definida como la figura exterior o disposición de los cuerpos u objetos, apariencia o aspecto.

La forma de una partícula individual es conveniente expresarla en términos de su esfericidad Φ_s , debido a que es más fácil comparar la forma de una partícula con una esfera la cual es independiente del tamaño de la misma.

Para una partícula esférica de diámetro D_p , $\Phi_s = 1$; para una partícula no esférica la esfericidad se define por la relación:

$$\Phi_s = \frac{6V_p}{D_p s_p} \quad (1.1)$$

En donde:

D_p = Diámetro equivalente de la partícula.

s_p = área superficial de la partícula.

V_p = volumen de la partícula.

Para cubos y cilindros en los que la longitud es igual al diámetro (se toma D_p como la altura del cubo o del cilindro), Φ_s es la unidad. Para partículas irregulares como se muestra en la tabla 1, Φ_s es menor a la unidad. Para materiales triturados se encuentra entre 0.6 y 0.7.

(Mc Cabe, 1982)

Tabla 1 Esfericidad de diversos materiales

MATERIAL	ESFERICIDAD Φ_s
Esferas, cubos y cilindros ($L = D_p$)	1.0
Arena	0.83
Carbón en polvo, pulverizado	0.73
Arena angular	0.73
Vidrio pulverizado	0.65
Hojuelas de mica	0.28

(Mc Cabe, 1982)

Como se mencionó las partículas se pueden clasificar en: partículas de forma irregular que son las más comunes y partículas de forma regular como lo son las partículas de forma esférica.

1.2.1.1 Partículas de forma regular e irregular

El tamaño exacto de una partícula irregular no puede ser medido. La muestra puede consistir en una mezcla de partículas individuales agregadas y aglomeradas.

Entre las características de las partículas más importantes se encuentran: distribución de tamaño, aglomeración, estado de agregación, color, densidad, dureza, estado magnético, punto de fusión, porosidad, índice de refracción, tamaño de partícula y distribución de tamaño, solubilidad, área superficial.

Las expresiones de tamaño de una partícula individual de forma regular normalmente son clasificadas en base a las características geométricas de su silueta y una esfera equivalente con respecto a alguna propiedad. En la Tabla 2 se muestran algunos de los métodos para expresar el tamaño de partículas irregulares. Cuando una partícula es circunscrita por un prisma rectangular con una longitud l , una anchura b , y una altura t , su tamaño es expresado por el diámetro obtenido de estas tres dimensiones. Estas pueden ser medidas con un microscopio y obtener varios diámetros de los que se obtendrá un promedio.

El diámetro de Feret, el diámetro de Martin, y el diámetro del tamiz (descritos en la Tabla 2) son diámetros geométricos obtenidos de la silueta de la partícula.

Los diámetros equivalentes son los diámetros de esferas que tienen las mismas propiedades geométricas o físicas. (Linoya, 1991)

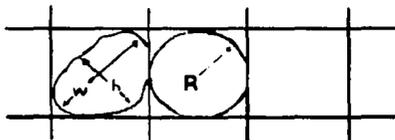
Los primeros seis métodos para expresar el tamaño de partículas irregulares (Tabla 2) fueron obtenidos por microscopio y análisis de imagen, el diámetro de tamiz de una partícula, se obtuvo por medio de un análisis de tamices, el diámetro superficial por métodos de superficie, el diámetro de Stokes por métodos de sedimentación.

Al seleccionar un método, se debe elegir uno que se correlacione estrechamente con el proceso o problema al que será aplicado. (Fayed, Et al. 1984):

1.2.1.2 Caracterización del tamaño de partícula: Existen varios métodos para la caracterización del tamaño de partículas entre esos métodos tenemos.

- En la Fig. 1 se esquematiza la manera en que se lleva a cabo la caracterización de la forma de partícula por de la abertura del tamiz, en esta se representa una partícula con una anchura (w) y una altura de partícula (h), las aberturas de malla van desde 5 cm a $40\mu\text{m}$. De aquí que el tamaño de la partícula retenida se define como la esfera a la cual se ajusta la abertura del cuadrado. Si la partícula atraviesa la malla, entonces se dice que es el tamaño equivalente de la esfera de radio R .

Otro método común consiste en designar la malla que tiene una abertura que corresponde al diámetro de la partícula; debe especificarse también la escala de tamiz, para evitar confusiones. (Fayed, et al. 1984)

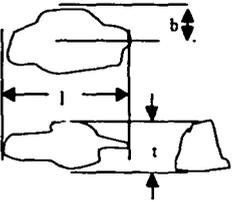


Ampliación de las aperturas de una malla

Fig.1 Esquemmatización de una partícula retenida en la malla de un tamiz.

Si la partícula fuera muy lisa, la anchura w dominaría la probabilidad de la partícula de atravesar el tamiz de un tamaño dado porque h es muy pequeño comparado con w , si w y h son dimensiones aproximadamente comparables.

Tabla 2 Métodos para expresar el tamaño de partículas irregulares

Espesor promedio: t	El diámetro promedio entre las superficies más altas y más bajas de una partícula en su posición más estable de descanso o su posición más estable.	
Longitud promedio: l	El diámetro promedio de la cuerda más larga, medida a lo largo de la superficie más alta de la partícula en su posición de descanso.	
Ancho promedio: b	El diámetro promedio del ángulo recto medido, a lo largo de la superficie más alta de la partícula en su posición de descanso.	
Diámetro de Feret.	El diámetro entre dos tangentes de los ángulos rectos en la dirección a analizar, la cual toca dos extremos de la silueta de la partícula en su posición de descanso.	
Diámetro de Martin.	El diámetro el cual divide la partícula en dos áreas iguales medidas en la dirección a analizar cuando la partícula se encuentra en su posición de descanso.	

(Linoya, 1991)

Tabla 2 Continuación..

Diámetro del área proyectada	de El diámetro de la esfera que tiene la misma área proyectada que la partícula en su posición de descanso.	
Diámetro de tamiz de partícula.	de La anchura de la abertura cuadrada mínima a través de la cual la partícula pasará.	 <p>a_1, a_2 abertura de los tamices. $(a_1 + a_2) / 2$ ó $a_1 a_2$</p>
Diámetro superficie específica.	de El diámetro de la esfera que tiene la misma proporción de área de la superficie externa que la partícula.	$(s/\pi)^{1/2}$ s= superficie.
Diámetro de superficie.	de El diámetro de la esfera que tiene la misma área superficial que la partícula.	
Diámetro Stokes.	de El diámetro de la esfera que tiene la misma velocidad terminal que la partícula.	$D_{St} = \left[\frac{18\mu u t}{g(\rho_r - \rho_f) C c} \right]^{1/2}$

(Linoya, 1991)

- En la Fig. 2 se muestra la caracterización de forma según la longitud y altura de la partícula por medio del microscopio, esta caracterización se realiza midiendo la dimensión más larga de la partícula (longitud) L y la anchura máxima W que es perpendicular a la longitud. Combinando los valores obtenidos de W y L , se puede conseguir una medida del tamaño de partícula y si dividimos L entre W , se puede obtener una aproximación del aspecto de la partícula. La partícula es caracterizada solo por dos parámetros. Este método es útil para la caracterización de partículas, pero un sistema más rápido fue desarrollado. Fig. 3 (Fayed, et al. 1984)

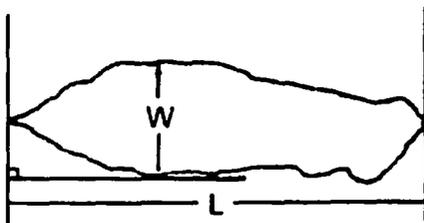


Fig. 2 Longitud y altura de una partícula.

- En la Fig. 3 se muestra la caracterización de forma por medio del círculo inscrito y circunscrito: Se usan una serie de círculos. el círculo más pequeño es el círculo que puede inscribirse en la partícula (D_i) y que abarcará lo ancho de la partícula, y el círculo más grande es aquel que podrá abarcar a la partícula completamente (D_c), (Fayed, et al. 1984)

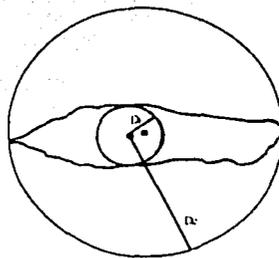


Fig. 3 Esquematización de una partícula por medio de círculo inscrito y circunscrito.

En la siguiente Tabla 3 tenemos un ejemplo de caracterización por medio de círculo inscrito y circunscrito, en donde tenemos los valores en cm del diámetro inscrito y diámetro circunscrito.

Tabla 3 Caracterización por medio de círculo inscrito y circunscrito.

D_i / D_c	cm
D_i = diámetro inscrito	0.26
D_c = diámetro circunscrito	0.55

(Fayed, et al, 1984)

Entre los dos parámetros obtenidos por el método de caracterización según la longitud y altura de la partícula mostrado en la Fig. 2 y los obtenidos por el método de caracterización por círculo inscrito y circunscrito mostrado en la Fig. 3 existe una alta correlación. Por ejemplo, la longitud en la Fig. 2 es bastante cercana al diámetro obtenido del círculo circunscrito con un valor de $D_c = 0.55$ cm y el ancho de la partícula en la Fig. 2 es comparable al diámetro obtenido del círculo inscrito con un valor de $D_i = 0.26$ cm. El método de caracterización por círculo inscrito y circunscrito es un método que describe bastante bien la apariencia de una partícula.

- En la Fig. 4 se esquematiza la caracterización de forma en base a la velocidad de caída de un fluido. Este método consiste en dejar caer una partícula en un fluido y medir su velocidad hasta que toca fondo. Se coloca la partícula en el líquido y se mide su velocidad, entonces se puede obtener una estimación del tamaño de la partícula, si la partícula es gruesa, entonces se tomará la velocidad en la que la partícula se deposita en el fondo y es estable y se puede decir que es equivalente en tamaño a una esfera de la misma densidad que también es estable en esa velocidad y por lo tanto se puede medir su diámetro y obtener así el tamaño de la partícula. Por otro lado si la partícula es más larga, entonces se puede comparar su tamaño a un cilindro equivalente con la misma densidad a la misma velocidad. Existen variaciones en la técnica de sedimentación, se pueden tener partículas en flujo laminar o flujo turbulento dependiendo de la forma de la partícula, dos partículas que son estables en la misma región de flujo laminar con velocidades idénticas pueden tener velocidades diferentes en la región turbulenta. En la Fig. 4 se observa una partícula en la que por su longitud se puede comparar su tamaño a un cilindro que tenga la misma densidad y velocidad. (Fayed, et al, 1984)

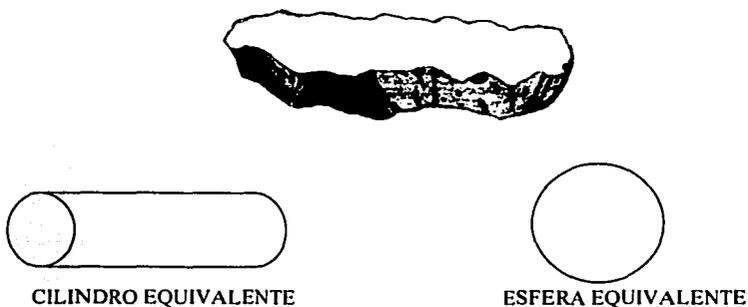


Fig. 4 Esquematización de una partícula equivalente a un cilindro o una esfera.

- En la Fig. 5 se esquematiza la caracterización de forma de partícula por medio de microscopio óptico automatizado: este método permite medir dos nuevos parámetros el área proyectada y el perímetro proyectado de la partícula. Observando la silueta de las partículas por medio de un microscopio, se obtiene una medida del área por medio de la silueta y por la longitud total de la línea que queda dentro de la silueta de la partícula. (Fayed, Et al. 1984)

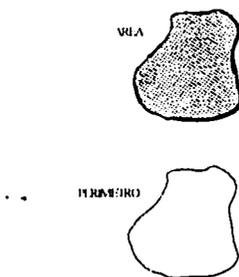


Fig. 5 Partículas observadas por medio del microscopio óptico automatizado

1.2.2 Análisis de distribución del tamaño de partícula

Medición del tamaño de partícula.

Las partículas se pueden observar y medir en grupos y en forma individual. Las partículas algunas veces son descritas como finas o toscas, pero por ejemplo las partículas finas de arena de 250 μm son considerablemente grandes comparadas con las partículas finas de azúcar de 50 μm y las dos son consideradas como finas. (Rhodes, 1990)

Las propiedades físicas más importantes de partículas y polvos se presentan en la Tabla 4, con respecto al tamaño de partículas la (o las) dimensión (es) que se reportan dependen de la forma misma.

En general, los diámetros deben especificarse para cualquier partícula, equidimensionales (igual en todas direcciones. Las partículas que no son equidimensionales (más largo en una dirección que en otras) se caracterizan por la segunda dimensión más larga. Para partículas en forma de aguja por ejemplo, D_p (el diámetro de partícula) se refiere al espesor de la partícula, no a su longitud. (Rhodes, 1990)

Tabla 4 Propiedades de las partículas y de los polvos

PROPIEDADES DE PARTÍCULA INDIVIDUAL	PROPIEDADES DE PÓLVOS.
Tamaño de partícula.	Distribución del tamaño de partícula por número, superficie o masa.
Forma de la partícula.	Distribución de forma del tamaño de partícula.
Densidad.	Distribución de la densidad con el tamaño de partícula, porcentaje de densidad.
Superficie específica de una partícula. $S_v = 6/x.$ $X =$ diámetro.	Superficie específica. $S_v = \frac{\text{Superficie total de la muestra}}{\text{Volumen total de la muestra}}$

(Rhodes, 1990)

Por convención, el tamaño de partícula se expresa en diferentes unidades dependiendo del rango de tamaño involucrado. Partículas gruesas son medidas en pulgadas o centímetros; las partículas finas en términos del tamaño de tamiz; partículas muy finas en micrómetros o nanómetros, para partículas ultra finas.

algunas veces se describe en términos de su área superficial por unidad de masa, usualmente en metros cuadrados por gramo.

Lo más importante para la medición del tamaño de partícula es establecer la verdadera distribución del tamaño de partícula. Si los polvos contienen sólo partículas esféricas, no existe dificultad en definir su tamaño, porque el tamaño de la esfera es únicamente determinado por su diámetro.

Pero las partículas en muy pocas ocasiones tienen una forma esférica, se encuentran en constante movimiento y tienen una forma irregular. Los métodos experimentales varían considerablemente y de esto depende el resultado que se observa del tamaño de partícula el cual está determinado por la metodología y la técnica empleada. Es así que la distribución de tamaño sirve como base para establecer características descriptivas o constantes, como un diámetro medio. (Rhodes, 1990)

La distribución del tamaño de la partícula se presenta ya sea según una base de frecuencia, o bien acumulativa. El método más común consiste en realizar una gráfica del tamaño de partícula en función del porcentaje de peso acumulativo de material mayor o menor que dicho tamaño.

Para la determinación del diámetro de las partículas los métodos que con más frecuencia se aplican son los basados en la inercia como las centrifugas de aerosoles. Los diámetros medidos de las partículas deben representar hasta donde sea posible, el diámetro real de la partícula.

Para el control de polvo se recomienda que primero se haga un examen cualitativo preliminar del mismo, sin un conteo detallado de las partículas. Una estimación visual de la distribución del diámetro de partícula proporciona a menudo una guía suficiente para una determinación preliminar de los requerimientos del equipo de recolección. (Perry, 1992)

1.2.2.1 Métodos de medición de distribución del tamaño de partícula.

En la Tabla 5 se esquematizan algunos de los equipos y métodos de análisis para la determinación del tamaño de partícula (el parámetro medido es la longitud) por ejemplo, para partículas muy finas entre 0.01 a 10 micras se utilizan los microscopios y para partículas mayores por ejemplo a 37 micras se utilizan los tamices.

En la Tabla 6 se presentan los métodos de análisis del tamaño de partícula utilizando como parámetros medidos además de la longitud como en la Tabla 5, el área y el volumen, además del método o instrumento utilizado para la medición, el medio en el que se realiza la prueba,

los rangos de tamaño para los cuales es válido el método y el principio o ecuación utilizado para su análisis.

Tabla 5. Ejemplos de métodos de análisis y equipos para determinar el tamaño de partículas:

TAMAÑO DE PARTÍCULA (MICRAS)	MÉTODO GENERAL	EJEMPLOS DE INSTRUMENTOS ESPECÍFICOS.
10 y mayores	Análisis de tamiz por vía seca.	Tyler Ro-Tap. tamiz AlpineJet.
37 y mayores	Análisis de tamiz por vía húmeda.	Tamices Buckbee-Mears.
1-100	Microscopio óptico. Microscopio con rastreador y contador. Sedimentación por gravedad en seco.	Zeiss, Bausch & Lomb, microscopios Nikon. Sistema Millipore IIMC. Analizador de rodillos. micromerógrafo Sharples.
0.2-20	Dispersión de la luz. Impactor en cascada Sedimentación por centrifuga en húmedo.	Royco. Impactores Brink, Anderson Analizadora M.S.A-Whitby.
0.01-10	Ultracentrifuga. Microscopio electrónico de transmisión. Microscopio electrónico de exploración.	Espectrómetro de aerosoles Goetz. Microscopios Phillips, RCA, Hitachi, Zeiss, Siemens. Sistema Reist & Burgess.

(Perry, 1992)

F a l t a

P á g i n a

1 | 7 |

Tabla 6. Métodos de análisis de distribución del tamaño de partícula.

PARÁMETRO MEDIDO	MÉTODO O INSTRUMENTO	MEDIO EN EL QUE SE MIDE	RANGO APROXIMADO DE TAMAÑO (µm)	CONCENTRACIÓN	PRINCIPIO/ ECUACIÓN APLICADA
LONGITUD	<ul style="list-style-type: none"> Microscopio Microscopio electrónico Tamizado 	Gas Vacio Gas Líquido	> 0.5 > 0.001 > 3		
AREA Adsorción de Gas Permeabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> Método de adsorción. BET Método de la permeabilidad. 	Gas Líquido Gas	> 0.01 > 0.1		Ec. Kozeny Carman.
VOLUMEN Resistencia eléctrica.	<ul style="list-style-type: none"> Contador Coulter 	Líquido	> 0.3	Baja	
Movimiento gravitacional en un fluido.	<ul style="list-style-type: none"> Ultramicroscopio (individual) 	Gas.	> 1	Baja	Ecuación de Stokes.
Colocación.	<ul style="list-style-type: none"> Concentración diferencial. 	Liq.	> 1	Alta	Ec. de Stokes.
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> Concentración acumulativa. 	Liq.	> 1	Alta	Ec. de Stokes.
Centrífuga	<ul style="list-style-type: none"> Concentración diferencial. 	Liq.	> 0.05	Alta	Ecuación de Stokes.
Velocidad de colocación.	<ul style="list-style-type: none"> Centrífuga en espiral. 	Gas	0.05 - 1	Alta- baja	Ecuación de Stokes.
Colección inercial	<ul style="list-style-type: none"> Impactor, método de aceleración. 	Gas	> 0.5	Alta- baja	Tiempo de relajación.
Movimiento inercial	<ul style="list-style-type: none"> Impactor, método de difusión del aerosol. 	Gas	> 0.5	Alta- baja	En baja presión.
Pérdida de difusión	<ul style="list-style-type: none"> Batería de difusión 	Gas	0.002-0.5	Alta- baja	Movimiento Browniano.
Movimiento Browniano	<ul style="list-style-type: none"> Correlación del fotón 	Liq.	0.02-1	Alta	
Intensidad de luz	<ul style="list-style-type: none"> Luz esparcida Difracción de luz 	Gas Liq. Gas	> 0.1 > 1	Baja Alta- baja	Teoría Mie

Ecuación de Stokes

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f) g D_p^2}{18 \mu}$$

Ecuación de Koseny-Carman

$$\Delta P = \frac{5 S_B^2 L \mu u}{\epsilon^3} = \frac{5 S_V^2 (1 - \epsilon^2) L \mu u}{\epsilon^3}$$

(Linoya, 1991)

Descripción de métodos para la medición de la distribución del tamaño de partícula.

1. MICROSCOPIO: Por medio de un microscopio óptico, pueden contarse partículas en un rango entre 0.5-50µm, considerando que las partículas de 0.001-5 µm, deben ser contadas en un microscopio electrónico. Para las determinaciones de frecuencia, el número de partículas que tienen que ser contadas en algún rango de tamaño esta dado por Allen en la siguiente ecuación:

$$\sigma(F_1) = \left[\frac{F_1(100 - F_1)}{n_t} \right]^{1/2} \quad (1.2)$$

En donde:

$\sigma(F_1)$ = Desviación estándar expresada como un porcentaje del total a través de la frecuencia.

F_1 = frecuencia de partículas en un rango de tamaños dado.

n_t = número de partículas de todos los rangos.

En la mayoría de los casos n_t debe ser mayor a 600.

Para distribuciones de peso, el número puede ser calculado como:

$$\sigma(Mq) = \frac{Mq}{nd} \quad (1.3)$$

En donde:

$\sigma(Mq)$ = desviación estándar expresada como un porcentaje del total a través del peso.

Mq = porcentaje de peso en el rango de tamaño dado.

nd = número de partículas contadas en el microscopio en el rango de tamaños.

Para distribuciones de peso, el número de partículas contadas en el rango debe ser generalmente entre 15 y 30.

2. **TAMIZADO:** El tamizado es el método más ampliamente usado para el análisis de tamaño, puede realizarse en estado seco, o puede suspenderse en un líquido apropiado, y la suspensión pasará a través del tamiz, pero para propósitos prácticos, el tamizado húmedo se realiza para partículas menores que las retenidas en la malla 200, y el tamizado en seco se realiza para partículas mayores que las retenidas en malla 200.(Washington 1992. Esto es porque la energía superficial y la carga asociada con partículas por debajo de la malla 200 induce la aglomeración, y una buena separación se dificulta.

Tamizado Manual

Es el método más simple, siempre debe llevarse a cabo al desarrollar una nueva prueba de análisis de tamices aun cuando finalmente se utilice un equipo mecánico de tamizado. Se coloca el polvo en el tamiz más fino y se cierra con una tapa. la cantidad de material a tamizar no debe sobrepasar las dimensiones de la tapa. 200g es lo más recomendado, pero depende de las propiedades del polvo como son la densidad. Se golpea el tamiz suavemente con la mano o con un pedazo de madera rotándolo gradualmente. El polvo se transfiere al tamiz más grande y el proceso se repite hasta obtener el material más grande.

Tamizado Mecánico

El tamizado mecánico se realiza principalmente con vibradores que agitan una serie de tamices (de 5 a 10 tamices) progresivos. se coloca la muestra en el tamiz y se agita por un periodo de 20 minutos. el tiempo de tamizado normalmente se determina por una serie de ensayos para producir una operación normal.(Washington, 1992)

El tamizado representa la forma más simple y la más utilizada para la determinación de la distribución de tamaño de partícula (Fonner, 1990), para partículas entre un rango de 3 y 0.0015 pulgadas. Los tamices son de alambre tejido y las aberturas son cuadradas, las aberturas reales son más pequeñas que las correspondientes a los números de malla, debido al espesor del alambre. La serie de Tyler es la más comúnmente utilizada y se basa en la malla # 200.

El área de las aberturas en cualquier malla en la serie, es exactamente dos veces las aberturas de la siguiente malla. La proporción de la dimensión de la malla, con respecto a la siguiente malla es, $\sqrt{2} = 1.41$. (Mc Cabe, 1982)

En la Fig. 6 se muestra la curva obtenida de un proceso de tamizado propuesta por Whitby, esta puede ser dividida en 3 diferentes regiones, con un rango de transición entre éstas. La curva se obtiene graficando el % acumulado de peso que pasa por el tamiz contra el tiempo de tamizado. (Fonner, 1990)

La región 1 se encuentra al comienzo del tamizado cuando existen muchas partículas mucho menores que el tamaño de la malla del tamiz. La región 3 existe cuando las partículas en el tamiz se encuentran cerca de la malla mayor. La región 2 es la zona de transición entre las dos. (Fayed, Et al 1984)

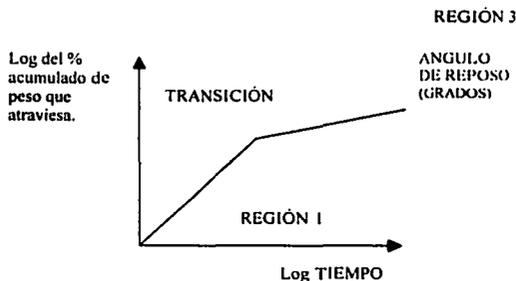


Fig. 6. Curva de un proceso de tamizado según Whitby

El tamizado es considerado en equilibrio con el tiempo cuando las dos regiones tienen una ligera inclinación positiva, esto se debe generalmente a la atrición de las partículas más largas que las del tamaño de la malla. (Fonner, 1990)

En la región 3, el porcentaje que pasa a través del tamiz es muy pequeño, y para propósitos prácticos el tamizado se detiene cuando el porcentaje de la muestra que pasa es menor a 0.1% durante un minuto. (Fayed, Et al, 1984)

Los tamices son utilizados dependiendo del material, tradicionalmente se emplean para tamaños de partículas mayores a 37 μm .

La forma en que se comporta la partícula es una función del tamaño de la partícula, de la forma de la partícula, de la densidad y de la superficie. (Fonner, 1990)

1.2.2.2 Análisis por medio de tamices.

El análisis de tamices se basa en el uso de un juego de tamices con dimensiones conocidas. En el proceso de tamizado se utilizan dos o más tamices que tienen diferentes tamaños de malla, las partículas que tienen una medida similar parecida a la geométrica del tamaño de la malla pasaran a una malla más pequeña. El número de tamices a utilizar depende de la distribución de tamaño, pero usualmente son cinco o seis.

Para análisis de tamices de partículas finas por debajo de 40 μm , se utilizan micro tamices (laminas de metal perforadas y preparadas electrolíticamente). Estas permiten un análisis de tamaño por debajo de 3 μm . Los datos pueden observarse en la Tabla 7 en donde se encuentra la serie de tamices estándar.

Las máquinas usadas para la clasificación, ayudan al tamizado por ejemplo: la máquina de clasificación Tyler Ro-Tap y la máquina vibratoria ultrasónica y electromagnética.

El tiempo de tamizado es aproximadamente 10 minutos. Para polvos húmedos o partículas menores a 100 μm , el tamizado húmedo en agua o en alcohol es ventajoso (Linoya, 1991)

Tabla 7 Serie de tamices estándar (2)

JISZ8801 1982	ASTM		Tyler No.	BS410-1962	
	E11-70	No.		Tamaño de malla	No.
38µm	38µm	400	400		
45	45	325	325	45 µm	350
53	53	270	270	53	300
63	63	230	250	63	240
75	75	200	200	75	220
90	90	170	170	90	170
106	106	140	150	105	150
125	125	120	115	125	120
150	150	100	100	150	100
180	180	80	80	180	85
212	212	70	65	210	72
250	250	60	60	250	60
300	300	50	48	300	52
355	355	45	42	355	44
425	425	40	35	420	36
500	500	35	32	500	30
600	600	30	28	600	25
710	710	25	24	710	22
850	850	20	20	850	18
1.00 mm	1.00 mm	18	16	1.00 mm	16
1.18	1.18	16	14	1.20	14
1.40	1.40	14	12	1.40	12
1.70	1.70	12	10	1.68	10
2.00	2.00	10	9	2.00	8
2.36	2.36	8	8	2.40	7
2.80	2.80	7	7	2.80	6
3.35	3.35	6	6	3.35	5
4.00	4.00	5	5		
4.75	4.75	4	4		
5.6	5.6		3 1/2		

(Mc Cabe, 1982)

Representación Tabular

La forma más general de presentar los datos de distribución de tamaños es en forma tabular; la Tabla 8 ilustra la manera más común de presentar datos en forma tabular. La distribución se presenta como frecuencias y como frecuencias acumulativas. Los datos de frecuencia en la tabla son presentados por peso en lugar de por número. La distribución del tamaño puede definirse en términos de peso o número de partículas dentro de un rango del tamaño dado.

Tabla 8 Datos de distribución de tamaños en base a serie Tyler

TAMAÑO (μ)	% DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA POR PESO	% ACUMULATIVO
0-100	5.0	5.0
100-200	17.0	22.0
200-300	18.0	40.0
300-400	25.0	55.0
400-500	11.0	66.0
500-600	8.0	74.0
600-700	6.0	80.0
700-800	4.0	84.0
800-900	3.0	87.0
900-1000	2.0	89.0
≥ 1000	11.0	
	100.0	

(Mc Cabe, 1982)

Para la granulación representada en la tabla 8, 5% del peso de las partículas se encuentran en un rango de 0 a 100 μm , 17% del peso se encuentra en un rango de 100 a 200 μm y así sucesivamente.

De la distribución acumulativa, 22% de las partículas que pasan son menores de 200 micras en tamaño, 40% de las partículas son menores a 300 micras en tamaño, y así sucesivamente.

Representación Gráfica

Los gráficos son más concisos que las tablas, y en algunos casos, pueden obtenerse medidas numéricas o constantes que describen la distribución de tamaños de la partícula.

Los histogramas son curvas de la distribución de tamaño, y la frecuencia acumulativa representa la forma más común de ilustrar los datos de distribución de tamaño gráficamente.

Histogramas de Frecuencia

La forma gráfica más simple del histograma de frecuencia es en la que se traza como una función del rango del tamaño, como se observa en la Fig. 7. El histograma es la gráfica que representa la fracción masa retenida entre los límites de los tamices en función de la abertura del tamiz.

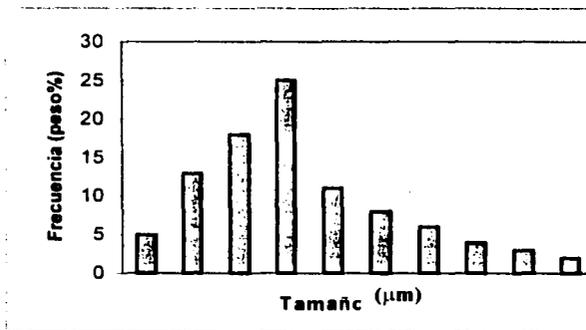


Fig. 7 Histograma de Frecuencia.

La altura de cada rectángulo corresponde al por ciento de frecuencia para cada rango de tamaño indicado; por ejemplo la altura de cada rectángulo en el rango 0 a 100 μm es 5% en la escala de frecuencia y esto indica que 5% del peso de las partículas se encuentran entre el rango de tamaño de 0 a 100 μm .

Curvas de frecuencia

Las curvas de frecuencia se obtienen del histograma como se muestra en la Fig. 8

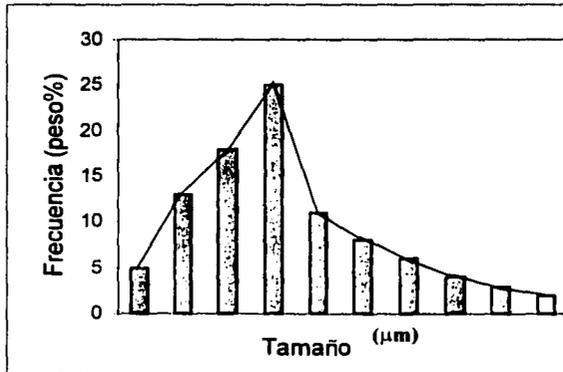


Fig. 8 Ilustración de la curva de frecuencia

La curva de frecuencia se obtiene dibujando una línea continua a través de los puntos medios en la parte superior de los rectángulos. Estas curvas son válidas sólo si un gran número de puntos son utilizados. La forma de la curva de frecuencia puede ser irregular si los rangos de tamaño usados no son iguales

La curva de frecuencia indica las fracciones del total retenido por cada uno de los tamices en función del diámetro promedio de las partículas retenidas entre los límites de los tamices.

Curvas de frecuencia acumulativa

Las curvas de frecuencia acumulativa se obtienen graficando el porcentaje de partículas menor (o mayor) que un tamaño de partícula dado, contra el tamaño de la partícula

Las gráficas se construyen con la cantidad acumulada como porcentaje inferior al tamaño considerado, en función del tamaño de las partículas.

La distribución del tamaño de partícula puede ser expresada como una distribución de curvas de frecuencia $f(x)$ o curvas acumulativas; las dos se relacionan basándose en los datos del análisis de tamices Tabla 9 y las gráficas de la Fig. 9

Tabla 9 Análisis de Tamices

# MALLA	X_i Retenida	ABERTURA (in)	D_p (in)	X_i retenida Acumulativa	X_i que pasa Acumulativa
10	0	0.065	0	0	1
14	0.075	0.046	0.055	0.075	0.925
20	0.136	0.0328	0.0394	0.211	0.789
28	0.158	0.0232	0.0280	0.369	0.631
35	0.154	0.0164	0.0197	0.523	0.477
48	0.133	0.0116	0.0138	0.656	0.344
65	0.106	0.0082	0.0098	0.762	0.238
100	0.082	0.0058	0.0070	0.864	0.156
150	0.056	0.0041	0.0049	0.9	0.1
200	0.043	0.0029	0.0035	0.943	0.0057
Fondo	0.057	0	0.0014	1	0

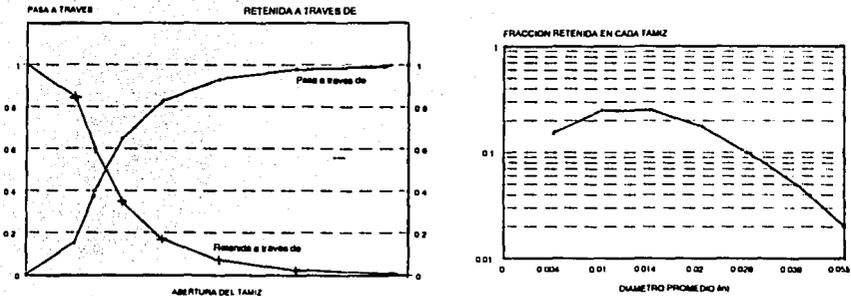


Fig. 9 Relación entre distribuciones de frecuencia y distribuciones de frecuencia acumulativa.

3. **SEDIMENTACIÓN:** los métodos de sedimentación involucran un instrumento que detecta la proporción de partículas en un fluido por monitoreo de: a) el cambio en la concentración de partículas a una profundidad conocida en el fluido o, b) la velocidad a la cual las partículas se colocan en el fondo del contenedor en un tiempo dado. El parámetro de medición es el diámetro de Stokes, y el cálculo de este diámetro obedece la ley de Stokes.

La sedimentación bajo gravedad generalmente se usa para partículas mayores a $2\mu\text{m}$, y la sedimentación bajo la fuerza centrífuga es utilizada para tamaños menores a este valor. (Fayed Et al. 1984).

4. **PERMEAMETRÍA:** Al contrario de la mayoría de los métodos anteriores, la permeametría proporciona una medida del diámetro de la superficie en un tamaño promedio. Cuando se considera el flujo de un fluido a través de camas empacadas de partículas, se obtiene una relación lineal entre la velocidad de flujo y la caída de presión.

Los aparatos para la medición de diámetros específicos son simples y se dividen en dos tipos en flujo constante y volumen constante. (Fayed, Et al, 1984). Los métodos de volumen constante son más simples y más fáciles. La

Tabla 10 Muestra los métodos disponibles.

Tabla 10 Método de Permeametría

	Tiempo de Análisis (min.)	Rango de tamaño recomendado (μm)	Cantidad de muestra Necesaria (g)
1.Presión Atmosférica			
1.1 Estado estable Fisher; Ridgen; Permaran	5	2 - 75	5
1.2 Flujo migratorio Blaine	5	2 - 75	50
2. Baja presión Flujo Micromeritics-Knudsen	45	0.1 - 75	10

(Fayed, Et al, 1984).

Muchos de los dispositivos desarrollados para la medición de diámetros de superficie específica fueron diseñados hace años. La versión comercial de este equipo es el Fisher Sub-Sieve. (Fig. 10) se observan dos orificios calibradores que permiten cambiar la sensibilidad de las mediciones por ejemplo hacer caer la presión a través de un orificio. Una dispositivo de medición se monta detrás del manómetro de presión, y está diseñada para que bajo condiciones estables el menisco superior del fluido indique el tamaño promedio de la partícula.

Los aparatos de medición de volumen constante son más difíciles de encontrar, el único es el diseñado por Blaine. Este consiste en un tubo en forma de U que contiene un fluido. La cama de polvo se ajusta al extremo superior del brazo del tubo en forma de u después de que el nivel de fluido ha sido elevado para que el nivel del menisco sea más alto que en el brazo abierto a la atmósfera. El tiempo requerido para que el menisco caiga de H_1 a H_2 es medido y el área específica superficial del polvo puede ser calculada así como el diámetro de la superficie específica estimado.

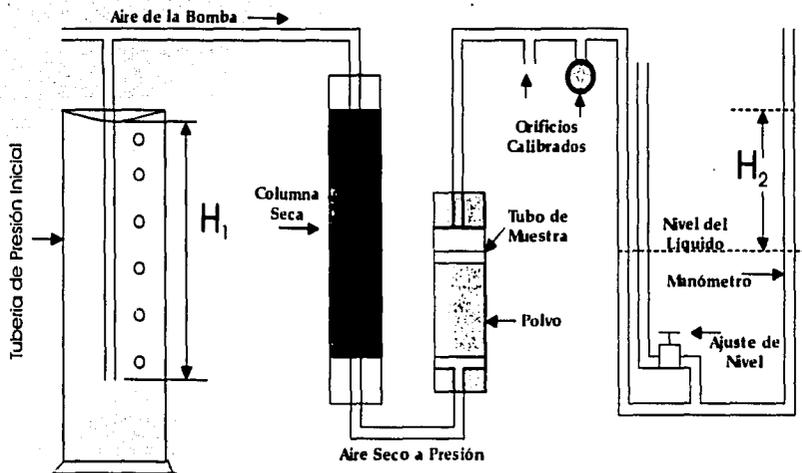


Fig. 10 Fisher Sub-Sieve.

1.3 Parámetros estadísticos.

Cuando una población de partículas esta representada por un número único, existen diversas mediciones de tendencia central y promedios de tamaño, estos incluyen: La mediana, moda y otras mediciones como: aritmética, geométrica, cuadrática, cúbica, bicuadrática por nombrar solo algunas.

Moda

La moda es el tamaño que se encuentra con mayor frecuencia en la muestra. El tamaño de la partícula corresponde al pico de curva de distribución diferencial. Algunas de las distribuciones pueden tener más de un pico y estos son multimodal. La moda no tiene un significado particular como una medida de tendencia central y es raramente utilizada.

Mediana

La mediana (o el 50% del tamaño) es el tamaño en el cual se encuentran la mitad de las partículas en la muestra son finas y en la otra mitad son gruesos. Esto es el tamaño que divide el área bajo la curva de distribución de diferencial por la mitad.

La mediana es muy utilizada porque es una medida de tendencia central fácil de determinar. En algunas aproximaciones analíticas la distribución del tamaño de partícula como la ley logaritmica normal, representa uno de los parámetros utilizados para describir la distribución. Como la moda sin embargo, la mediana usualmente no tiene un significado especial. (Rhodes. 1990)

Desviación Estándar

Hay muchos modos en los que se puede representar o describir la variación o la dispersión de los datos originales sobre el rendimiento. Por ejemplo, el nivel (el valor mayor menos el menor) o la diferencia promedio (sin tomar en consideración el signo algebraico) entre los valores y el promedio calculado serían métodos adecuados para su expresión. Sin embargo casi siempre, la cantidad más adecuada para describir (la estimación más confiable) la variabilidad se denomina desviación estándar.

La desviación estándar expresa la dispersión de la distribución, por medio de esta podemos saber si el material es mas o menos homogéneo, si la curva obtenida se encuentra mas abierta el material es menos homogéneo. (Fayed et al. 1984)

1.3.1 Cálculos estadísticos

Los datos de la Tabla 9 denotan el diámetro promedio "Dp" medido en micrómetros (micras). O bien por medio del análisis granulométrico aplicando el tamizado. (Fayed et al, 1984)

En la lista de datos Dp, denota el diámetro en micrómetros. En la Tabla 11.

DIÁMETRO MEDIO ARITMÉTICO (D)

$$D = \frac{\sum Dp_i}{n} \quad (1.4)$$

Dp_i = Diámetro promedio de cada intervalo

n = Número de fracciones

$$D = \frac{0.055 + 0.0394 + 0.028 + 0.014 + 0.0099 + 0.007 + 0.004 + 0.003 + 0.0014}{10}$$

$$D = 1.80 \times 10^{-2} \text{ in.}$$

El diámetro medio aritmético no es representativo y por lo tanto lo mas recomendado es usar el Sauter Medio.

SAUTER MEDIO (D_s)

Es el diámetro medio superficial el cual toma en cuenta el tamaño de todas y cada una de las fracciones en la distribución, es el inverso del diámetro medio aritmético y representa el tamaño central de la distribución.

$$D_s = \frac{1}{\sum x_i / D_{pi}} \quad (1.5)$$

$$D_s = \frac{1}{\frac{0.075}{0.055} + \frac{0.136}{0.0394} + \frac{0.158}{0.028} + \frac{0.154}{0.019} + \frac{0.133}{0.014} + \frac{0.106}{0.0099} + \frac{0.082}{0.007} + \frac{0.056}{0.004} + \frac{0.043}{0.003} + \frac{0.057}{0.0014}}$$

$$D_s = 8.3 \times 10^{-3} \text{ in.}$$

DESVIACIÓN ESTÁNDAR:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum Xi(D_{pi} - D_s)^2}{n - 1}}$$

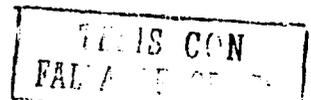
$$\sigma = \sqrt{\frac{100(0.1825 - 8.3 \times 10^{-3})^2}{10 - 1}}$$

$$\sigma = 0.5806$$

Valores pequeños de σ se trata de un producto más homogéneo.

Valores grandes de σ se trata de productos menos homogéneos.

Valores entre 1. 2 el material no es homogéneo.



CAPITULO II
SÓLIDOS PARTICULADOS Y
PARÁMETROS QUE LOS DESCRIBEN

2. Sólidos particulados

Las propiedades de polvos son susceptibles de cambiar aplicando una fuerza, se pueden aglomerar con el tiempo y puede ocurrir la segregación o la atrición, los polvos tienen una distribución de tamaño que afecta a todas las propiedades del mismo por lo tanto el muestreo es representativo y relevante para las pruebas subsecuentes.

El muestreo es un elemento importante en el manejo de polvos para el manejo y operación de los sólidos.

2.1 Muestreo de sólidos particulados.

El propósito del muestreo es coleccionar una masa manejable de material (muestra) que sea representativa de la masa total de polvo del que fue tomado. Esto se logra por combinación, el cual representa el total con un grado aceptable de exactitud, esto significa que todas las partículas en total, tienen la misma probabilidad de ser incluidas en la muestra final. Se recomienda para el muestreo que:

1. Se haga preferentemente por medio de un flujo en movimiento (esto aplica a polvos y suspensiones)
2. Se tome una muestra representativa de todo el polvo, en diferentes periodos de tiempo.

Es muy probable que la muestra primaria tomada del todo sea demasiado grande para muchas pruebas, y por lo tanto necesita ser subdividida en sub-muestras secundarias o terciarias. (Svarovsky, 1987)

Se dice a menudo que cualquier prueba en una muestra de polvo es tan buena como la técnica usada para coleccionar la muestra. El muestreo puede realizarse de dos maneras manual o mecánicamente.

2.1.1 Muestreo Manual.

El muestreo manual es aplicado para capacidades bajas, puede realizarse por medio de un flujo de polvo que cae sobre una superficie plana, o por medio de una tolva de alimentación (Fig.11), la primera opción, del flujo que cae, normalmente se usa para el traslado entre dos puntos por medio de una banda transportadora, debajo de un depósito de alimentación o descargando al final del extremo de un sistema de transporte neumático. El uso de palas es impropio y no es recomendado para el muestreo manual porque estas permiten a las partículas más gruesas rodar fuera de la muestra y así incluir en la muestra sólo los fragmentos más finos. (Svarovsky, 1987).

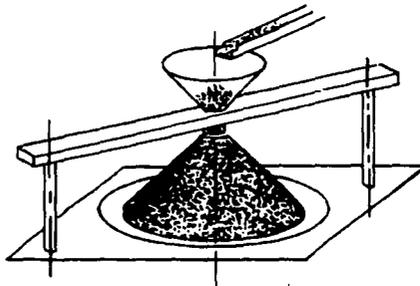


Fig.11 Flujo de polvo para el muestreo manual

Como un ejemplo de muestreo manual tenemos el muestreo por cuarteo: El muestreo es clave para la caracterización partículas en polvo. Las muestras representativas pueden obtenerse de una banda transportadora, por arrastre a través del cinturón con colectores apropiados de forma y tamaño. Un acercamiento para obtener la muestra total es aplicar la técnica del cono y el cuarto. El material se vierte con gran cuidado para producir un cono simétrico. Una hoja delgada de metal se usa para dividir en cuartos el montón de material. Un cuarto puede usarse para repetir el proceso y dar una muestra más pequeña.

2.1.2 Muestreo Mecánico.

En el muestreo mecánico el método de laboratorio más satisfactorio es el spinning riffler ver Fig. 12 el cual consiste en un alimentador vibratorio que vierte el material sobre un anillo con contenedores que gira bajo una corriente de polvo. (Washington, 1992). La muestra es llevada despacio por un alimentador vibratorio del depósito de alimentación hacia un carrusel en donde es dividido en muchas aberturas del recipiente por medio de una cabeza rotatoria. (Svarovsky, 1987)

Si el tiempo de rotación de los recipientes es mucho menor al tiempo de flujo del polvo, entonces se logra una separación al azar. (Rhodes, 1990)

El muestreo mecánico realizado con el spinning riffler es preferido del manual, debido a que colecta la muestra con una mayor precisión.

Las muestras primarias son normalmente reunidas por un cortador primario el cual corta la sección transversal del flujo (Fig. 12) que corta el flujo del polvo.

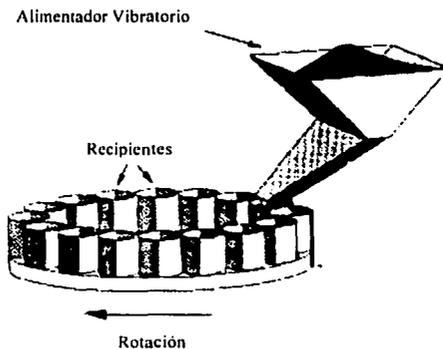


Fig. 12 Spinning riffler para el muestreo de polvo.

2.2 Fuerzas interparticulares actuantes en sólidos particulados.

Los sólidos particulados se atraen unos a otros y existen fuerzas que actúan entre ellas como son: las fuerzas interparticulares que actúan en los sólidos y dependen de la magnitud de las interacciones entre las partículas de los polvos y son por lo tanto determinantes en el comportamiento de las propiedades físicas como son cohesión y adhesión. Cuando estas están en contacto son predominantemente fuerzas superficiales. Cuando las fuerzas interparticulares alcanzan una magnitud considerable, se debe a que las partículas se integran a las parejas de moléculas que se encuentran alrededor del punto en donde las partículas se encuentran en contacto. (Rietema, 1992)

Los diversos tipos de fuerzas que pueden actuar entre sólidos particulados son:

1. Fuerzas capilares.
2. Fuerzas de tensión superficial.
3. Fuerzas electrostáticas.
4. Fuerzas de Van der Waals.

Estas fuerzas pueden afectar las propiedades de flujo de un sólido con polvos finos ($\leq 150 \mu\text{m}$) las fuerzas de Van der Waals son las que predominan.

1. Fuerzas Capilares

Las fuerzas capilares son causadas por la humedad la cual es condensada desde el gas cercano a la superficie de las partículas y entonces se forman los puentes líquidos entre las partículas vecinas. Estas fuerzas pueden ser muy fuertes, muchas veces el mismo peso de las partículas individuales.

2. Fuerzas de Tensión Superficial

Las fuerzas de tensión superficial resultan de la interacción entre partículas que algunas veces forman una película generalmente son muy pequeñas y no son significativas en comparación con otras fuerzas que actúan entre partículas.

Para partículas grandes ($\geq 150 \mu m$), como los granulados producidos por medio de una técnica de granulación húmeda, las fuerzas de tensión superficial normalmente predominan sobre las fuerzas de Van der Waals. (Rietema, 1992)

3. Fuerzas Electrostáticas

Otro tipo de fuerzas interparticulares son las electrostáticas. Las fuerzas electrostáticas surgen del contacto potencial y el exceso de carga disminuye con el tiempo. (Linoya, 1990). Cuando las partículas no conductoras se encuentran en contacto con la superficie de un material que tiene características semejantes a la partícula, es acompañado generalmente por un intercambio de electrones en la superficie, esto origina que las partículas sean cargadas eléctricamente ya sea de manera positiva o negativa. La dirección del intercambio depende de la naturaleza del contacto con las superficies. (Rietema, 1992)

El efecto generalmente es que todas las partículas son cargadas de manera similar. Por esto de acuerdo a la ley de Coulomb las fuerzas interparticulares causadas por este fenómeno no son atraídas.

En general las fuerzas electrostáticas son muy pequeñas comparadas con las fuerzas de Van der Waals. (Rietema, 1992)

4. Fuerzas Cohesivas o Fuerzas de Van der Waals

Cuando se evalúan las fuerzas interparticulares en los aglomerados de partículas grandes, las fuerzas cohesivas o fuerzas de Van der Waals se consideran insignificantes o iguales a cero. Las fuerzas de Van der Waals actúan en distancias sobre 1000 \AA . Las fuerzas de atracción de Van der Waals son la fuerza global de interacción molecular o atómica de partículas. (Linoya, 1990)

La fuerza adhesiva debido a un puente líquido (lente) se forma entre las partículas que surgen de la presión capilar negativa y la presión interfacial. La fuerza de atracción principal debido a un puente líquido se forma entre dos esferas iguales en contacto (modelo de interesferas) y es descrita por Linoya, 1991.

La fuerza es una función del perfil del puente líquido, de la forma de la partícula, y de la distancia entre las partículas. En la Fig. 13 se muestra el modelo de interesferas, en donde r es el radio de partícula, a es la distancia entre las partículas, θ es el ángulo de contacto, x es el puente líquido.

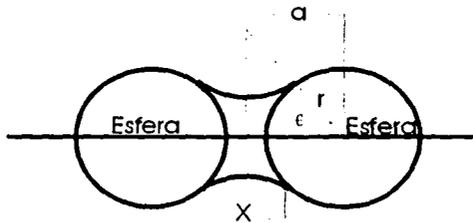


Fig. 13 Modelo de interesferas

2.3 Clasificación de sólidos particulados en base a su fluidez.

Los polvos o cualquier material particulado seco puede ser clasificado en diferentes categorías. La clasificación depende del tipo de manejo, existen por lo menos tres tipos: manejo y almacenamiento de polvos no-aireados, manejo de polvos aireados (desplazamiento de aire, fluidización), y transporte neumático.

2.3.1 Clasificación de sólidos particulados en un sistema no-aireado.

Entre la clasificación de sólidos particulados en un sistema no-aireado tenemos la clasificación que da Jenike apoyándose en los datos obtenidos experimentalmente de su celda, en general no existe ninguna correlación simple entre cualquiera de las propiedades primarias de polvos y sus características del manejo: la única guía que Jenike da, por ejemplo, es que, como una regla general, sólidos que no contienen partículas menores a 0.01 in (254 micras) usualmente fluyen libremente.

Jenike también menciona que la fluidez de un polvo es gobernada por las propiedades de flujo de la fracción fina, cualquier partícula más gruesa a 0.033 in (838 micras) se elimina antes de las pruebas usando la celda de Jenike.

2.3.1.1 Clasificación en base a la celda de cizalla. (Celda de Jenike).

Una definición precisa de fluidez en un polvo sólo es posible con varios números y curvas, derivadas de una familia de líneas de fluencia del polvo medidas con una celda de cizalla. Una línea de fluencia representa los esfuerzos necesarios para comenzar el flujo de un material particulado. Si se obtienen varias líneas de fluencia y se grafican se obtiene toda la información necesaria para caracterizar la fluidez de un material particulado (ver Capítulo 3 pagina 54 para mayores detalles) Jenike en 1970 propuso una clasificación simple, de acuerdo a la posición en un punto de falla. En la Fig. 14 se esquematiza el punto de falla que es definido como el esfuerzo normal aplicado para conseguir que el polvo fluya (con un valor fijo de esfuerzo de cizalla de 5 lbf (22.3 N), con respecto a la línea del factor de flujo (la línea de factor de flujo es la línea recta que pasa a través del origen), con una pendiente de $1/ff$ en donde ff nos indica si el polvo es cohesivo y no fluye, o si fluye fácilmente.

Si la pendiente ff se encuentra situada entre:

$ff < 2$ entonces el polvo es muy cohesivo y no fluye.

$2 < ff < 4$ el polvo es cohesivo.

$4 < ff < 10$ entonces el polvo fluye fácilmente.

$10 < ff$ entonces el polvo fluye libremente

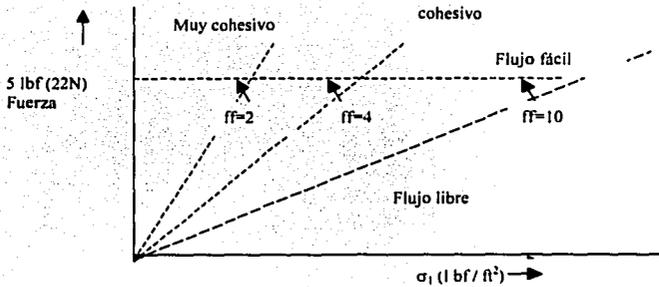


Fig. 14. Representación de la clasificación de Jenike

Además de la clasificación anterior, los polvos se han definido en simples como son aquellos cuyo punto de falla es una línea recta que pasa a través del origen.

2.3.1.2 Clasificación en base al espesor

Otra manera de clasificar a los polvos es en base a los resultados obtenidos con la prueba de compresión como se observa en la Fig. 15 El método es similar a apretar un polvo con la mano y observar si la masa se separa rápidamente o si permanece como un terrón. El equipo consiste en un tubo dividido en dos mitades que forman un molde, y son sujetados, por discos llamados "Micarta" de $1/4$ in (6 mm de espesor), 57g de peso, y de $1/2$ in (13 mm), con un peso de 113g un soporte y una barra con discos de aluminio sujetados a un extremo con la finalidad de aplicar presión a la muestra. El tubo es de $3 1/2$ in de diámetro cédula 40 hecho de níquel y latón. Al realizar una prueba de una muestra de polvo, el molde se coloca en la base del soporte, el molde es llenado con polvo, y la superficie es raspada. Un disco de $1/4$ es colocado sobre la superficie del polvo y se baja el émbolo de compresión.

Si el aglomerado de polvo no se derrumba por el peso de un disco, se agrega otro de $\frac{1}{4}$ in. En intervalos de 30 segundos se adiciona más peso hasta que el conglomerado se colapse. La fuerza total de compresión de 22 lb (10 kg) simula la mayor presión, y puede usarse para describir la fluidez, (cargas iniciales mayores son usadas para productos que no fluyen, como polvos inorgánicos, y cargas menores son usadas para productos que fluyen fácilmente, como materiales orgánicos) Esta es una versión simplificada de la prueba de compresión uniaxial, sobre un aglomerado cilíndrico de polvo, y la fuerza de compresión es medida directamente de la fluidez. Los esfuerzos de compresión usados para formar el aglomerado son generalmente mayores que aquellos usados en las pruebas de cizalla de Jenike, la fuerza de compresión total es de 22 lb. La forma de la curva Fig. 15 en la que se grafica la carga inicial de compresión contra el tiempo, indica la fluidez: Los productos que no fluyen se muestran con una línea horizontal, mientras que los productos con fluidez muestran el efecto del incremento de la compresión con el tiempo. (Svarovsky, 1987)

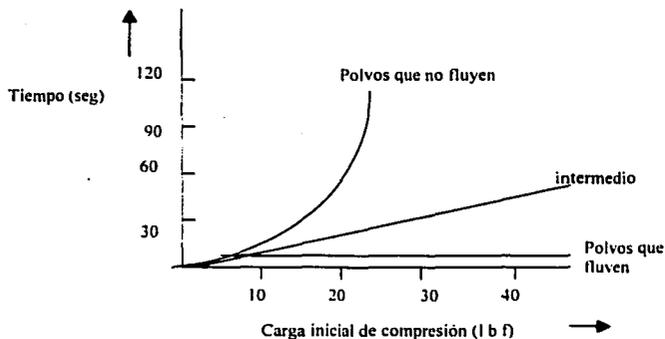


Fig. 15. Clasificación en base al espesor

2.3.2 Clasificación de polvos en el estado aireado (Lecho Fluidizado)

La fluidificación o fluidización convierte un lecho de partículas sólidas en una masa suspendida y expandida que posee muchas de las propiedades de un líquido. Esta masa tiene un ángulo de reposo igual a cero, busca su propio nivel y adopta la forma del recipiente que la contiene.

El tamaño de las partículas sólidas que se pueden fluidificar varía considerablemente, desde menos de $1\mu\text{m}$ hasta 6 cm. En general, se concluye que las partículas distribuidas en tamaños que varían entre 10 y $150\mu\text{m}$ son las que dan por resultado una fluidificación más uniforme. Las partículas grandes producen inestabilidad y dan por resultado ondas abultadas que golpean con fuerza. Las partículas pequeñas (inferiores a $20\mu\text{m}$), incluso secas, se suelen comportar como amortiguadores y forman aglomerados, fisuras o canalizaciones en el lecho. La adición de partículas gruesas, o bien, la adición de partículas gruesas a un lecho de finos da por resultado, por lo general, una mejor fluidificación.

La velocidad ascendente del gas varía generalmente entre 0.15 m/s y 6 m/s. Esta velocidad se basa en el flujo a través de un recipiente vacío y se conoce como velocidad superficial.

Geldart (1986) ha caracterizado cuatro grupos de sólidos, que muestran propiedades diferentes al fluidificarse con gas. Como se observa en la Fig. 16 aparece la división de las clases en función del diámetro medio de partícula d_v , μm , y la diferencia de densidades $(\rho_s - \rho_f)$, g/cm^3 , donde ρ_s = densidad de la partícula y ρ_f = densidad del fluido. $d_v = 1/\Sigma(x/d_v)$ d_s = diámetro del volumen de la superficie de la partícula, y x = fracción en peso de las partículas en cada intervalo de diámetro.

Cuando el gas pasa en dirección ascendente a través de un lecho de partículas de los grupos A, B o D, (Fig. 16) la fricción causa una caída de presión que se expresa por la correlación para lecho fijo de Carman-Koseny. A medida que se incrementa la velocidad del gas, aumenta la caída de presión hasta que se iguala al peso del lecho dividido entre el área de la sección transversal. Esta velocidad se conoce como

velocidad mínima de fluidificación, U_{mf} . Cuando se llega a este punto, el lecho de las partículas del grupo A se expande uniformemente, hasta que a determinada velocidad más elevada del gas se forman burbujas (la velocidad mínima de burbujeo, U_{mb}). Para las partículas de los grupos B y D, U_{mf} Y U_{mb} son esencialmente las mismas. Las partículas del grupo C muestran una tendencia a adherirse y a medida que se incrementa el flujo de gas, se abren canales que se extienden desde el distribuidor de gas hasta la superficie. A velocidades más elevadas o con agitación mecánica o vibración, este tipo de partículas se fluidifican, pero en forma de racimos o aglomerados. Para todos los grupos de polvos (A, B, C y D), si la velocidad del gas se incrementa aún más, la densidad del lecho disminuye y aumenta la turbulencia. En lechos de diámetro más pequeño, especialmente con los polvos de los grupos C y D se presenta un alentamiento, cuando el diámetro de las burbujas aumenta hasta más de la mitad del diámetro del lecho. Las burbujas crecen al unirse en forma vertical y lateral. Las burbujas también aumentan de diámetro al incrementarse la velocidad del gas.

Los polvos en el grupo A, llamados ligeramente cohesivos, muestran una gran expansión del lecho después de una fluidización mínima y antes del comienzo del burbujeo el tamaño de la burbuja está limitado. En los polvos del grupo B (por ejemplo arena) la burbuja se encuentra a la velocidad mínima de fluidización y la expansión del lecho es pequeña. Aquellos del grupo C (cohesivos) son difíciles de fluidizar y los del grupo D pueden formar lechos estables si el gas es admitido sólo a través de un orificio centralmente posicionado. Recientemente se han reconocido un grupo de transición AC llamado semi-cohesivo entre los grupos A y C.

Geldart y colaboradores (1984) han identificado parámetros los cuales pueden ser usados para clasificar a los polvos en los grupos antes mencionados. Los más obvios son la densidad y el tamaño de partícula: el rango aproximado para el producto de estas dos características de partícula $\rho_p d_p$ es por ejemplo entre 50 y 200 si la densidad esta en g/ml y el tamaño en micras para polvos en el grupo A, de 20 a 50 para el grupo AC y menores a 20 para el grupo C.

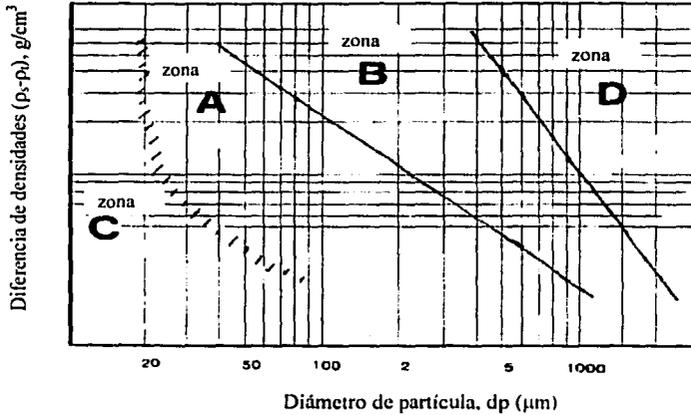


Fig. 16 Clasificación de Geldart

2.3.3 Clasificación de polvos en base a su comportamiento en transporte neumático.

Una de las técnicas más importantes del manejo de materiales, es el desplazamiento de materiales suspendidos en una corriente de aire, sobre distancias horizontales y verticales que van de unos pocos a varios centenares de pies. Se pueden manejar materiales que van desde polvos finos hasta gránulos de 6.35 mm y densidades de masa desde 16 a más de 3200 kg/m³.

La capacidad de un sistema neumático de transporte depende de:

- 1) La densidad de la masa del producto (así como también, hasta cierto punto, de la forma)
- 2) El tamaño de las partículas.
- 3) El contenido de energía del aire de transporte a lo largo de todo el sistema.

- 4) El diámetro de la línea de transporte.
- 5) La longitud equivalente de la línea de transporte.

En general los transportadores neumáticos se clasifican según cinco tipos básicos: de presión, de vacío, de combinación de presión y vacío, de fluidización y de tanque ventilador.

En los sistemas de presión se deja caer el material en una corriente de aire (por encima de la presión atmosférica) mediante un alimentador giratorio de exclusas. La velocidad de la corriente mantiene al material a granel en suspensión hasta que llega al recipiente receptor donde se separa del aire mediante un filtro o separador de ciclón.

Los sistemas de vacío se caracterizan por el desplazamiento de materiales en una corriente de aire a presión menor que la ambiental, el material permanece suspendido en la corriente de aire hasta que llega a un receptor. Ahí a un filtro o separador de ciclón. Los sistemas al vacío se suelen usar cuando los flujos no sobrepasen 6800 kg/h, la longitud equivalente del transportador es de menos de 305 m.

Los sistemas de presión vacío son una combinación de lo mejor de los métodos de presión y vacío. Se usa el vacío para inducir al material a entrar al transportador y desplazarse a una corta distancia hasta un separador. El aire pasa por un filtro al lado de sección de un ventilador de desplazamiento positivo, a continuación se alimenta el material a la corriente de aire de presión positiva del transportador mediante un alimentador giratorio, que procede del lado de descarga del ventilador.

Los sistemas de fluidización transportan con frecuencia materiales prefluidizados, divididos finamente y aquellos que no fluyen con libertad a distancias cortas. La fluidización se logra por medio de una cámara en la que se hace pasar aire por una membrana porosa que se forma en el fondo del transportador, sobre el que reposa el material a ser desplazado.

Una de las primeras aplicaciones del transporte neumático fue el tanque ventilador. En la actualidad se usa poco y funciona mediante la introducción de aire a presión a la parte superior de un recipiente a presión que contiene carga de material.

Si el material es de flujo libre, fluirá a través de una válvula al fondo de la cámara y se desplazará por una línea corta de transporte, que se limita por lo común a un máximo de 16 m (50ft) dependiendo del producto, aunque se encuentran en servicio sistemas hasta de 457 m (1500 ft)

El principio de tanques ventilador se puede utilizar para alimentar transportadores neumáticos regulares. (Perry, 1992)

Los materiales en el transporte neumático son clasificados en muchos más grupos que aquellos de importancia en fluidización. La clasificación usual es como sigue:

1. flujo libre.
2. menor flujo libre.
3. fluido.
4. fluido, baja retención de aire.
5. fluido, moderada retención de aire.
6. fluido, alta retención de aire.
7. muy cohesivo.
8. abrasivo.

El grupo 1 y 2 corresponden al grupo D, los grupos 3 y 4 corresponden aproximadamente al grupo B de materiales en el diagrama de Geldart, 5 y 6 al grupo A y 7 al grupo C. (Svarovsky, 1987)

2.4 Almacenamiento de sólidos particulados.

El diseño y estructura para el almacenamiento de sólidos particulados debe proporcionar una estructura, volumen específico de almacenamiento y protección adecuada para el material almacenado.

Para el almacenamiento de sólidos particulados se tienen las siguientes definiciones (Fayed Et al, 1984)

- Recipientes (Bins): Cualquier recipiente vertical para guardar el conjunto de sólidos.
- Silo: Un recipiente alto, en donde $H > 1.5 D$ (H es la altura vertical y D es el diámetro de un recipiente redondo o la dimensión del lado más corto de una caja rectangular.)
- Bunker: Una caja poco profunda, donde $H < 1.5 D$ o en donde él "el plano de ruptura" corta la superficie de los sólidos almacenados.
- Depósito de alimentación: Una inclinación que converge a la sección de la pared unida al fondo de un silo.
- Comportamiento de flujo de los sólidos: Cuando los sólidos fluyen de un recipiente, los límites entre las regiones de flujo y de no-flujo se definen como el modelo de flujo. (Linoya, et al, 1991)

Características Generales De Los Silos y Bunkers:

- Los materiales granulares deben de colectarse, distribuirse, y almacenarse eficientemente en conjunto.
- Comparado con el almacenamiento en una superficie lisa, la capacidad de almacenamiento de un silo es mayor en el mismo espacio.
- El costo del equipo por unidad de capacidad de almacenamiento es pequeño, comparada con el almacenamiento en piso.
- La carga automática, la descarga y el control de volumen de almacenamiento es posible.

- Operaciones como presurización, aislamiento del calor, pruebas de humedad son realizadas fácilmente.
- Los cambios en la calidad, la descomposición, y el daño de materiales causados por insectos y ratas puede prevenirse.
- Un silo puede incorporarse fácilmente como una parte de un sistema en la producción industrial.

Recipientes Sencillos Y Recipientes De Grupo.

Para un solo recipiente, se usa frecuentemente una sección circular, debido a algunas ventajas en su diseño y construcción, se han construido silos de cemento y de acero (en forma circular, rectangular y hexagonal) para el almacenamiento de sólidos particulados, la ventaja de este tipo de silos es que es una estructura hermética que no permite la entrada de aire al polvo.

Las construcciones de concreto usualmente son diseñadas con diámetros de 30 m hasta 45 m, entre las técnicas usadas para la construcción de silos tenemos las siguientes:

Duelas de concreto. Los silos se forman por ensamble de las duelas en forma circular hasta formar un cilindro. Las duelas tienen usualmente las siguientes dimensiones de 250 a 300 mm de ancho por 500 a 750 mm de largo y de 60 a 100 mm de espesor. Estos silos protegen de los cambios súbitos de temperatura y minimizar la humedad interior de las paredes.

Silos prefabricados. En su estructura básica estos silos están formados por losas de 4.5 m de largo por 0.5 m de alto, estos son colocados en una posición horizontal y en cada extremo se atan dos postes verticales de concreto, esta técnica es usada para formar depósitos de cualquier forma rectangular, hexagonal, etc.

Silos en forma de salto. Se forman de secciones de aproximadamente 1.8 m de largo por 1.3 m de alto, colocados en forma circular, estas construcciones proveen un sistema de almacenamiento intermedio en tamaño de almacenamiento, los más usados son de forma cilíndrica de 9 a 18 m de diámetro por 46 m de alto.

En la Fig. 17 se observa un silo construido de cemento y acero de forma circular con una sección transversal para observar el interior del mismo y las tolvas de almacenamiento para polvos. (Linoya, et al, 1991)

Cuando el polvo es recibido es elevado hasta el techo del almacén estructurado por una pierna que consiste en una banda continua vertical, la cual tiene cubos adheridos. La parte inferior de la pierna contiene una polea trasera debajo de la cual corre la banda. Los cubos son recogidos por debajo y luego vuelven a ascender de esta manera cargan su contenido. cuando alcanzan el techo de la pierna pasan sobre la polea y vuelven a descender de esta manera descargan su contenido en un receptor o acumulador.

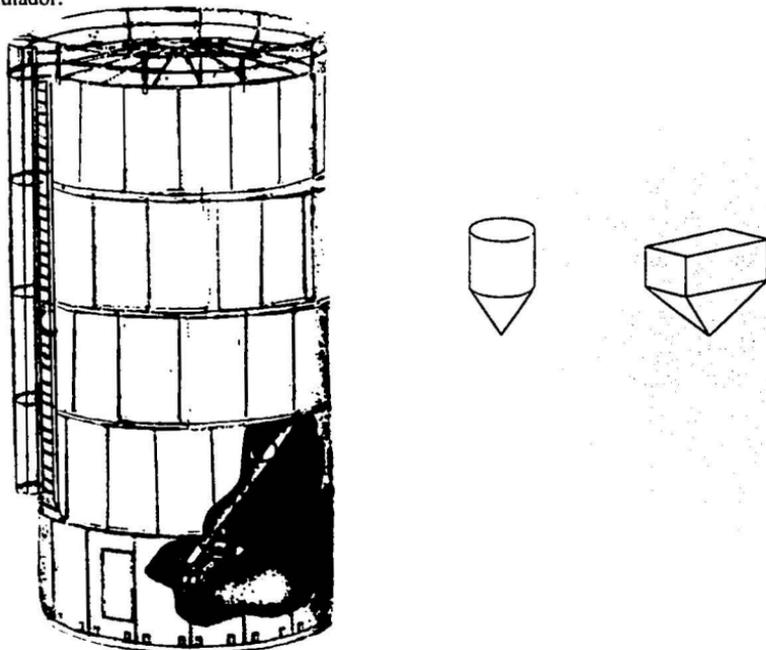


Fig. 17 Silo y tolvas más comunes en el almacenamiento y descarga de polvos.

TEJIS CON
FALSA DE ORIGEN

CAPITULO III
CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS
PARTICULADOS

3.1 Parámetros aplicables en la caracterización de sólidos particulados.

Definición de fluidez

La fluidez de un polvo se define como la facilidad para fluir y se relaciona con el cambio de posición de partículas individuales. La fluidez de un polvo está relacionada con las propiedades físicas como: la fuerza de fricción que ocurre entre las partículas de un polvo en sus áreas de contacto y disminuye si el tamaño de partícula aumenta así como la fuerza cohesiva que es una medida de la magnitud de las fuerzas de atracción que actúan entre las partículas de un polvo. El comportamiento dinámico de los polvos está determinado básicamente por las fuerzas interparticulares y la estructura del empaque.

3.1.1 Caracterización de fluidez de materiales particulados

Cuando un polvo fluye como resultado de la aplicación de un esfuerzo, la magnitud de la fuerza de cizalla necesaria para causar el flujo depende de la densidad del material, la cual depende de los esfuerzos normales.

Esta información sólo puede ser obtenida por pruebas llevadas a cabo en una celda de cizalla, en donde el polvo es consolidado en la dirección vertical y entonces se cizalla en un plano horizontal. Existen dos tipos celdas de cizalla: la celda de Jenike y la celda de cizalla anular. la más comúnmente utilizada es la celda de cizalla de Jenike. (Svarovsky, 1987)

La celda vista en un plano como se observa en la Fig. 18. tiene un diámetro interno de 95 mm. Consiste en una base y un anillo que pueden deslizarse horizontalmente sobre la base. El anillo y la base se llena con polvo. Por medio de un transportador de peso que se coloca en el centro de la tapa, se aplica una fuerza vertical al polvo de prueba.

El primer objetivo de estas pruebas es encontrar la carga normal bajo la cual la muestra no cambiará en volumen cuando es cizallada, esta condición es el estado crítico.

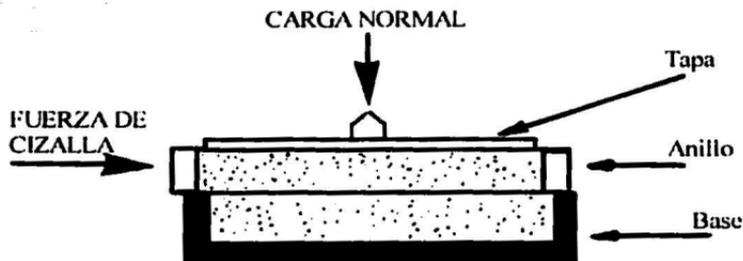


Fig. 18. Celda de Cizalla de Jenike

Se preparan 3 o 4 muestras diferentes bajo cargas normales diferentes:

El procedimiento experimental es como se observa en la Fig. 19:

1. Se utiliza un procedimiento estandarizado para llenar la celda con el polvo de muestra. La celda se llena con polvo y se compacta con la tapa.
2. Se aplica una carga vertical bajo la cual la muestra no puede cambiar en volumen cuando esta es cizallada (carga en el punto final) se encuentra por medio de prueba y error.
3. Se aplica una carga vertical (menor que la carga en el punto final) se coloca la tapa en la celda.
4. El motor es conectado causando en el anillo y su contenido una división, a una velocidad constante.
5. La celda es vaciada y una nueva muestra es preparada.
6. La fuerza de cizalla de la prueba es medida con una carga normal diferente.

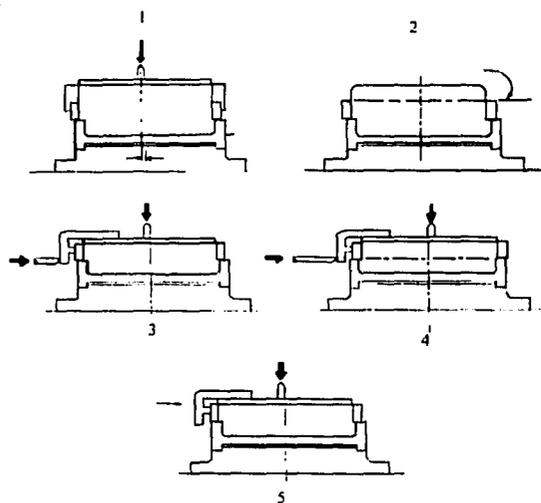


Fig. 19 Procedimiento experimental de la celda de Jenike

Los resultados de las pruebas son utilizados para producir una gráfica llamada línea de fluencia de Jenike (JYL). La gráfica JYL, en la cual el esfuerzo de cizalla se grafica contra el esfuerzo normal. Si el material comienza a comportarse como cohesivo la línea de fluencia de Jenike no es una línea recta y no pasa a través del origen, se muestra que la gráfica cuando es extrapolada hacia abajo corta el eje horizontal. La intersección OT es el esfuerzo de tensión de la muestra y la intersección OC es la cohesión del material.

La línea de fluencia de Jenike representa los resultados de una serie de pruebas en muestras las cuales tienen la misma densidad. Graficando varias de líneas de fluencia de Jenike como la que se observa en la Fig. 20 se obtiene toda la información necesaria para caracterizar la fluidez de un material particulado.

La esencia del método de Jenike para el diseño de tolvas de alimentación, es unir los conceptos de línea de fluencia, como se observa en la Fig. 20 y el círculo Mohr (Descrito más adelante) Ambos gráficos pueden dibujarse en el mismo diagrama, en el cual el eje vertical es el esfuerzo de corte y el eje horizontal es el esfuerzo normal.

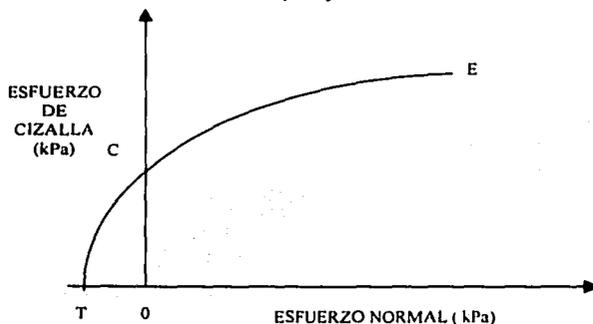


Fig. 20. Línea de fluencia de Jenike

La línea de fluencia da los esfuerzos necesarios para comenzar el flujo de un material particulado.

Diferentes esfuerzos que se aplican al material, pueden ser representados por el círculo Mohr. Como se esquematiza en la Fig.21 si el círculo queda totalmente debajo de la línea de fluencia y no lo toca en ningún punto, significa que la condición de esfuerzo necesario para causar el flujo no está satisfecha y el material no fluirá bajo este esfuerzo.

Si el círculo Mohr toca la línea de fluencia, representa un juego de esfuerzos que provocarán un flujo.

Si el flujo de una tolva de alimentación se detiene debido a la formación de un arco en la salida de la tolva, una parte del material en la superficie del arco quedará en un espacio libre, el plano superficial no tendrá esfuerzo normal y ningún esfuerzo de corte actuará en él.

El círculo Mohr representa los esfuerzos que actúan en la superficie del material y deben pasar a través del origen el esfuerzo normal y el esfuerzo de corte, ambos serán cero.

Un círculo que pasa por el origen y toca la línea de fluencia representa el esfuerzo necesario para iniciar el flujo en la superficie del arco, causando un hundimiento.

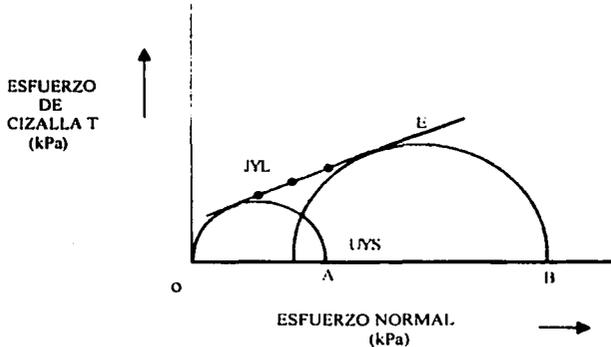


Fig. 21 Derivación de un punto en MFF y un valor de δ .

El diámetro de este círculo OA en la figura indica el esfuerzo necesario para provocar el hundimiento del arco. Normalmente se identifica con las siglas UYS (Unconfined Yield Stress), Jenike le da el símbolo f_c .

El valor de UYS obtenido se refiere al estado de compactación de las muestras en donde la línea de fluencia fue obtenida.

Cada línea de fluencia tiene un punto final E como se observa en la Fig. 21 el cual representa las condiciones para la falla sin ningún cambio de volumen. También representa las condiciones de esfuerzo en el polvo cuando fluye hacia abajo, hacia la salida.

El círculo Mohr representa los esfuerzos que actúan en el polvo en el momento en que el arco se forma, es el círculo el cual toca la línea de fluencia tangencialmente en su punto final como lo muestra la Fig. 21.

El esfuerzo de compactación esta dado por la longitud OB, con el símbolo σ_1 . Cada línea de fluencia puede dar un par de valores de UYS y σ_1 .

Si los valores de UYS son graficados contra σ_1 se obtendrá una gráfica como la de la Fig. 22 en donde se representa la cohesividad del material.

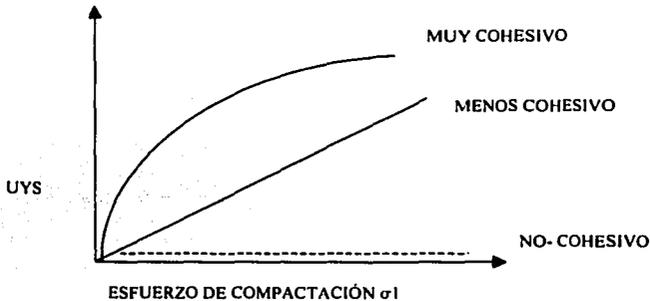


Fig. 22. Valores de Cohesión

Esta gráfica describe una propiedad importante de un material particulado, esta es llamada función de flujo del material MFF y da el esfuerzo necesario para realizar un hundimiento del arco como una función del esfuerzo de compactación bajo el cual fue formado.

Otra propiedad que podemos obtener de las líneas de fluencia es el ángulo efectivo de fricción interna del material particulado.

Jenike define esta propiedad como la inclinación de una línea recta que parte del origen y es tangencial al punto final del círculo Mohr con el símbolo δ .

3.1.2 Ángulo de fricción en la pared

Existe una propiedad mas que podemos obtener al diseñar una tolva, es el ángulo de fricción de la pared entre el material particulado y el material de la pared, las partículas deben resbalar por debajo de la pared del deposito de alimentación. Este ángulo puede ser obtenido reemplazando la base de la celda de cizalla de Jenike por un plato del material. El anillo de la celda de cizalla se coloca en el plato, se llena de polvo y la tapa se coloca en posición.

La fuerza de cizalla necesaria para empujar el anillo y su contenido hacia delante, a una velocidad constante se encuentra con diferentes cargas verticales en la tapa.

La inclinación al graficar la esfuerzo de cizalla contra el esfuerzo normal se obtiene el ángulo de fricción entre las partículas y la pared (ϕ_w) Esto completa las pruebas para un material particulado.

Las propiedades que se obtienen de las pruebas de fluidez en el material particulado son:

- El ángulo efectivo de fricción interna (δ)
- La función de flujo del material (MFF)
- El ángulo de fricción entre el material particulado y la pared. (ϕ_w)

3.1.3 Fuerza de Cohesión

Es una medida de la magnitud de las fuerzas de atracción que actúan entre las partículas de un polvo. Jenike ha determinado la cohesión mediante el procedimiento de análisis por cizallamiento con el que se obtiene una relación entre la presión vertical aplicada a la muestra contenida en un recipiente y las tensiones de cizalla medidas perpendicularmente a la dirección de dicha presión. Como se observa en la Fig. 23 representando los valores de la presión en las abscisas y las tensiones de cizalla en las ordenadas se obtiene la relación llamada línea de fluencia ("yield locus"), y su extrapolación, para un valor de presión cero, da el valor de cohesión sobre el eje de ordenadas. Así, las unidades de cohesión y de tensión de cizalla son las mismas.

Tabla 11 Valores de cohesión para algunos alimentos en polvo

MATERIAL	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	COHESIÓN (g / cm ²)
Gelatina	10.0	1
Leche	1.0	7
Leche	4.4	10
Cebolla	< 3.0	< 7
Cebolla	3-6	8-15

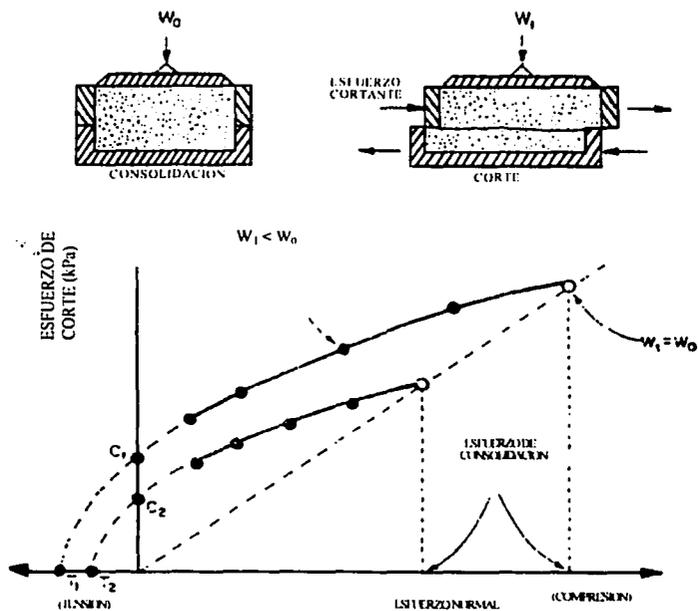


Fig. 23 Líneas de fluencia determinadas experimentalmente

3.2 Definición de propiedades de falla

Las propiedades básicas, son referidas como propiedades de falla que nos dan algunas expresiones de fluidez y son las siguientes:

1. El ángulo de fricción en la pared.
2. El ángulo efectivo de fricción interna.
3. La función de falla.
4. Cohesión.
5. Ultimo esfuerzo de tensión

Las primeras tres propiedades de falla, se encuentran directamente relacionadas con el flujo de polvos.

Las propiedades de falla en los polvos están fuertemente afectadas por la humedad y por una variación en su temperatura y en su grado de compresión, por lo tanto es importante realizar las pruebas bajo condiciones controladas.

Angulo de fricción en la pared: es la más simple de las cinco propiedades de falla; es equivalente al ángulo de fricción entre dos superficies sólidas, sólo que una de las dos superficies es ahora un polvo. Este describe la fricción entre el polvo y el material de construcción usado para delimitar al polvo, por ejemplo la pared de una tolva. Para minimizar las tensiones en la estructura del silo se requiere una alta fricción en la pared, porque los valores altos conducen a bajas presiones verticales y horizontales dentro de los depósitos de alimentación. Para diseñar depósitos de alimentación, sin embargo, se requiere una fricción en la pared baja porque los valores bajos dan como resultado ángulos de pared mayores

Para cualquier polvo y material de construcción de la pared del contenedor, existen dos diferentes ángulos de fricción que son medidos el estático y el dinámico. El ángulo estático es el que comienza el movimiento del polvo por encima de la superficie, aunque el dinámico normalmente es más bajo, es el que se requiere para mantener la muestra en movimiento.

Ésta es la propiedad de falla más simple para probar cuando el polvo depende del estado de consolidación. El equipo requerido incluye un anillo poco profundo, abierto o un marco cuadrado como se esquematiza en la Fig. 24 una tapa (no debe traslaparse con los lados del anillo) para la aplicación de carga normal, un sistema de soportes y pesos y un instrumento para la aplicación y grabación de la prueba de cizalla (normalmente se usa un dispositivo de tensión constante) Existe un equipo simple para medir el ángulo de fricción en la pared (de equipos Ajax (Bolton Ltd.)), El cual utiliza una celda de plástico redonda de 160 mm de diámetro y 25 mm y una altura de 25 mm, dentado en la tapa para la aplicación de la carga normal la fuerza de cizalla es aplicada.

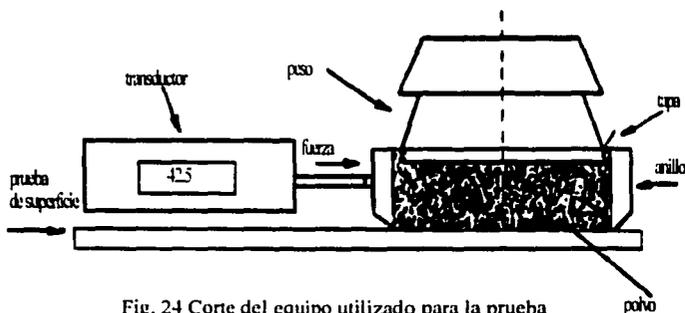


Fig. 24 Corte del equipo utilizado para la prueba de fricción en la pared

La evaluación de resultados de una prueba de fricción en la pared es muy simple, se grafica la fuerza de cizalla necesaria para mover la celda de carga contra la carga normal aplicada (ambos ejes deben tener las mismas unidades) y una línea recta se dibuja a través del plano. Ver Fig. 25 el ángulo de la línea con el eje x (eje de carga normal) es el ángulo de fricción en la pared.

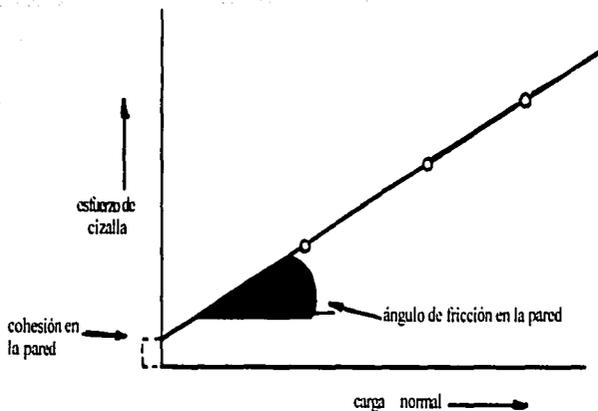


Fig. 25 Definición de ángulo de fricción en la pared (Svarovsky, 1987)

El ángulo efectivo de fricción interna: esta determinado por una serie de pruebas en el polvo las cuales miden una o más curvas de fuerza ("yield loci") en una gráfica de esfuerzo de cizalla (esfuerzo producto de la aplicación de una fuerza paralela al área) contra esfuerzo normal (esfuerzo producto de la aplicación de una fuerza sobre un área perpendicular) (Fig. 26) y muestra una curva para un estado de compactación y muestra como se obtiene el ángulo efectivo de fricción interna: es el ángulo que se obtiene de la línea recta que pasa por el origen y es tangencial al círculo Mohr (ver Fig. 29 para definición del círculo Mohr); el círculo Mohr representa el polvo que ha sido comprimido bajo un esfuerzo principal Σ_1 (ver Fig. 27 para definición) y un esfuerzo normal que no provoca un cambio de volumen. La condición sólo aplica a un polvo fluido (o un polvo que ha fluido previamente) porque ha alcanzado el estado crítico.

El ángulo efectivo de fricción interna puede ser determinado por medio de una sola línea de fluencia, pero es más confiable tomar un promedio de varios ángulos, medidos de una familia de líneas de fluencia, cada una correspondiendo a un estado de compactación diferente.

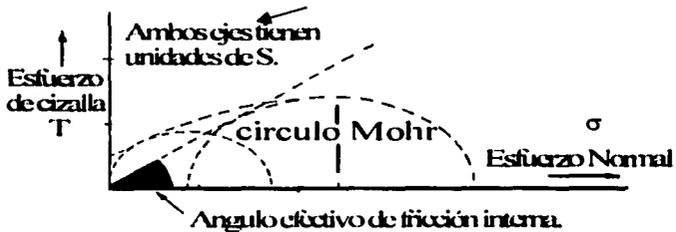


Fig. 26 Ángulo efectivo de fricción interna

En la Fig. 27 se esquematiza la **función de falla**: esta sólo puede ser determinada (si se usa una celda de cizalla, celda Jenike) por medio de un mínimo de tres líneas de fluencia y estas están disponibles para la medición del ángulo de fricción. La tercera propiedad no es sólo un número pero si una curva que es llamada función de falla. en el plano se grafica el punto de cendencia f_c , contra el esfuerzo de consolidación Σ_1 .

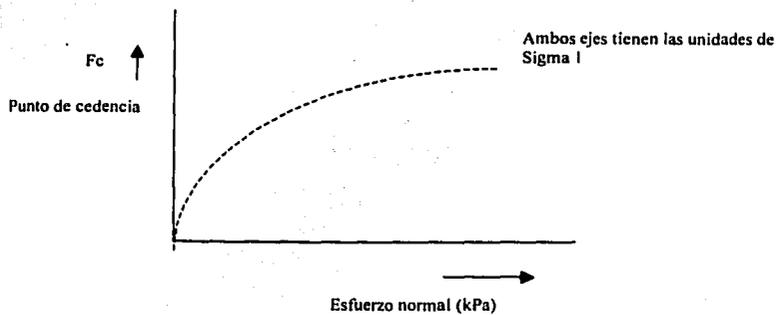
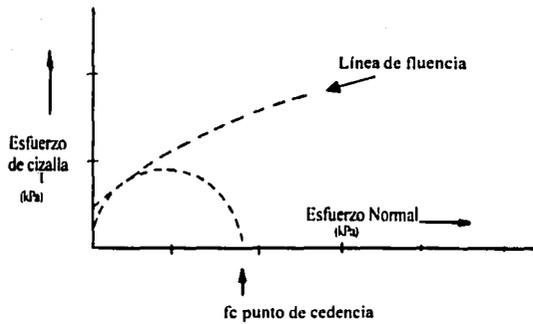


Fig. 27. Función de falla.

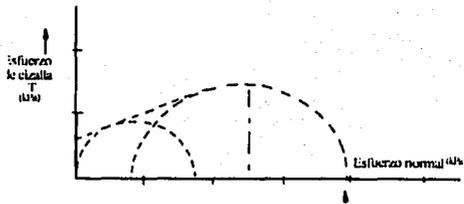
En el diseño de tolvas de alimentación la condición de flujo se satisface si los arcos se forman durante el flujo y se colapsan bajo su propio peso. Las condiciones en la superficie son tales que el esfuerzo normal es cero (porque no existe apoyo del lado del aire) y el esfuerzo de cizalla a lo largo de la superficie también es cero. El círculo Mohr debe atravesar el origen para describir esta condición y por consiguiente, si describe la función de falla, también debe tocar la línea de fluencia. El punto de cedencia es el esfuerzo principal f_c (ver Fig. 28), que actúa a lo largo de la superficie libre, necesariamente causa la falla (punto en donde el polvo comienza a fluir)

En la Fig. 28 (a) se muestra el valor del esfuerzo normal principal σ_1 , bajo el cual la muestra ha sido consolidada; este valor se obtiene dibujando un círculo Mohr a través del

punto final de la línea de fluencia (punto en el que el volumen no cambia), tangencial al sitio Fig. 28 (b) punto final de la línea de fluencia (punto en el que el volumen no cambia), tangencial al sitio Fig. 28 (b)



(a)



(b)

Fig. 28 Esfuerzo de consolidación principal

Una diferencia importante entre un sólido particulado y un fluido es que un fluido no puede resistir (excepto en el caso de un fluido plástico) una fuerza de cizalla cuando se encuentra en reposo, por el contrario un sólido particulado si puede.

Se tiene un dispositivo que medirá los componentes normales y tangenciales de la fuerza ejercida en el sensor. Si se sumerge el sensor en el agua y se mide la presión en diferentes direcciones a la misma profundidad se encuentra que la fuerza normal es siempre la misma en cualquier dirección y la fuerza tangencial o fuerza de cizalla siempre será cero. Si se sumerge el sensor en un sólido particulado y se repite la prueba se observa que la fuerza normal variara sobre los límites superiores e inferiores; las direcciones de las fuerzas normales más altas y más bajas serán de 90° separadamente. Estas direcciones coincidirían con las direcciones en las que el componente normal tiene sus valores máximos y mínimos y se refieren al plano principal. El plano principal mayor es aquel en el que no hay esfuerzo de cizalla y el componente normal tiene su valor más alto. El plano principal menor no tiene esfuerzo de cizalla y el esfuerzo normal tiene su valor más bajo. Si trazamos un gráfico en el cual el eje horizontal es el esfuerzo normal y el eje vertical es el esfuerzo de cizalla, la línea que representa los valores correspondientes a los componentes normal y de cizalla cuando el sensor se mueve en círculo con su centro en el eje horizontal. Este círculo el cual se muestra en al Fig. 29 es llamado **Círculo Mohr**

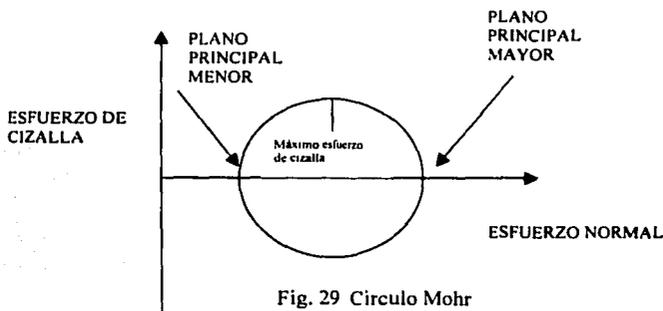


Fig. 29 Círculo Mohr

3.3 Obtención del círculo Mohr

El círculo es obtenido trazando el esfuerzo normal en la abscisa y el esfuerzo de cizalla en la ordenada (usando el mismo factor de escala para ambas ejes) Sabiendo que el esfuerzo normal de tensión es positivo y el esfuerzo normal de compresión es negativo y también el par de esfuerzos de cizalla que se mueven en el sentido de las agujas del reloj se trazan sobre el eje horizontal, el par de esfuerzos de cizalla que se mueven en sentido contrario a las manecillas del reloj se trazan por debajo del eje horizontal. En las siguientes figuras se muestra la construcción del círculo Mohr.

En algún punto de la superficie, los esfuerzos fueron determinados como se observa en la Fig. 30

$$\sigma_x = 15 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = 25 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 12 \text{ MPa}$$

- Construcción del círculo Mohr para estos esfuerzos.
- Utilizar el círculo Mohr para determinar el esfuerzo principal y las direcciones principales.

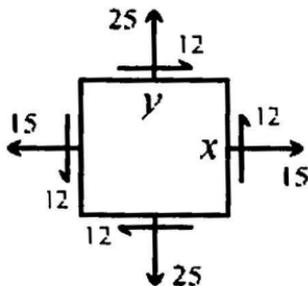


Fig. 30 Determinación de esfuerzos para la construcción del círculo Mohr

Comenzamos dibujando los ejes σ - τ y localizando las líneas verticales las cuales representan el esfuerzo normal $\sigma_x = 15$ MPa y $\sigma_y = 25$ MPa. Como se observa en la Fig. 31

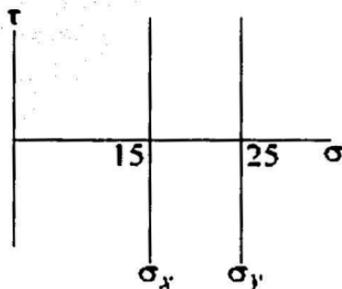


Fig. 31 Localización de las líneas correspondientes a los esfuerzos normales.

Localización De Los Esfuerzos De Cizalla

Como se observa en la Fig.32 se agregan las líneas horizontales las cuales representan los esfuerzos de cizalla de $\tau_{xy} = 12$ Mpa. Existen dos de esas líneas, una representa el esfuerzo normal en la superficie vertical (V, normalmente en la dirección x); la otra representa el esfuerzo de cizalla en la superficie horizontal (H, normalmente en la dirección y)

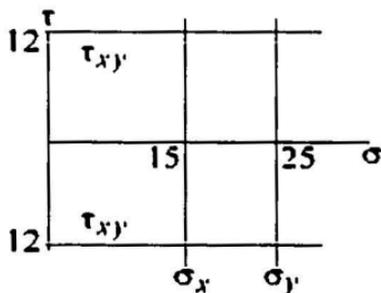


Fig. 32 Localización de las líneas correspondientes a los esfuerzos de cizalla.

Dibujar el círculo

Los puntos en la parte superior del círculo Mohr, representan los esfuerzos de cizalla que causan una rotación en el sentido de las manecillas del reloj, la H o superficie de y esta representada en la esquina superior del rectángulo en la Fig. 33 ($\sigma_x = 15$ MPa y $\sigma_y = 25$ MPa) entonces la superficie V de x esta representada en parte inferior de la esquina del rectángulo en la Fig. 34 ($\sigma_x = 15$ MPa y $\sigma_y = 25$ MPa)

La línea que une estos dos puntos es el diámetro del círculo de Mohr, como se muestra en la Fig. 33

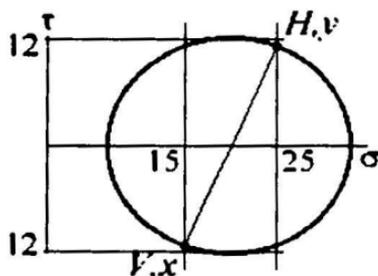


Fig. 33 Representación del diámetro del círculo Mohr.

El esfuerzo principal máximo σ_{p1} es el punto en el círculo en el cual σ es el máximo punto A en la Fig.34

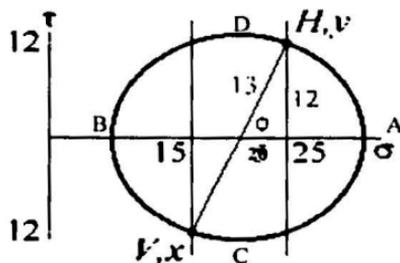


Fig.34 Representación del esfuerzo principal máximo.

La cohesión y el último esfuerzo de tensión La cohesión es una medida de la magnitud de las fuerzas de atracción que actúan entre las partículas de un polvo y el último esfuerzo de tensión es el esfuerzo necesario para romper las fuerzas de atracción estos no se usan en el diseño de tolvas de alimentación pero son usados por muchas industrias para el manejo de polvos. Los dos son definidos en la intersección de la línea de fluencia como se observa en la Fig. 35. (Moreyra, 1991)

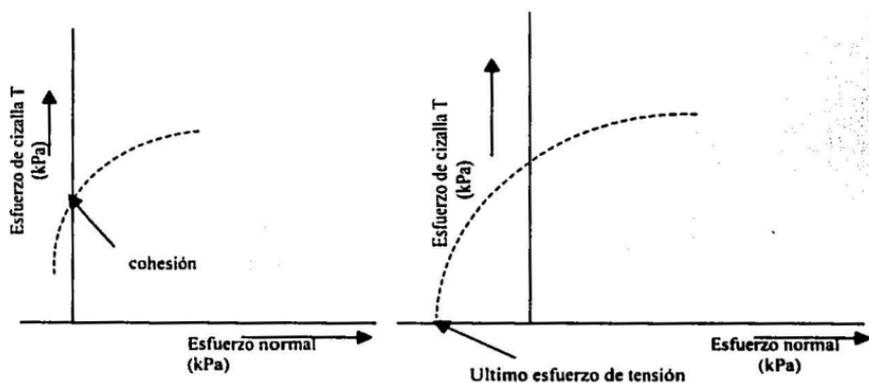


Fig. 35 Cohesión y ultimo esfuerzo de tensión

3.4 Propiedades de flujo

Existen propiedades fundamentales de los sólidos particulados que influyen en las propiedades de flujo entre otras tenemos: tamaño de partícula, distribución del tamaño de partícula, textura superficial o rugosidad, área superficial.

Algunos de estos métodos mas comúnmente utilizados para obtener las propiedades de flujo son:

1. Angulo de reposo.
2. Fuerzas de cizalla
3. Medición de propiedades de flujo en tolva.

Diversos tipos de propiedades angulares han sido empleados para fijar la fluidez como son: ángulo de reposo, ángulo de deslizamiento o fricción, ángulo de ruptura, ángulo de espátula, ángulo de fricción interna.

De estos ángulos, el ángulo de reposo y el ángulo de fricción interna son los más relevantes para predecir el flujo de las partículas.

Ángulo De Reposo

El ángulo de reposo se define como el ángulo del plano horizontal a la superficie libre de un acumulado de polvo bajo la tensión critica en el campo gravitatorio. (Svarovsky, 1987)

Existen 4 métodos principales para la medición del ángulo de reposo: (definidos en página 84)

- 1) Embudo fijo y cono libre.
- 2) Cono de cama fija.
- 3) Caja inclinada.
- 4) Cilindro giratorio.

El ángulo de reposo es utilizado para partículas $\geq 150 \mu\text{m}$. En este rango de tamaño, los efectos de cohesividad pueden ser mínimos y el coeficiente de fricción puede ser grande dependiendo sobre todo del comportamiento del polvo. El valor del ángulo de reposo para un material dado depende de las propiedades superficiales de las partículas que afectan la fluidez. Sin embargo el flujo de partículas gruesas puede ser determinado por medio de la disposición de las partículas. Por esta razón un auxiliar para determinar la fluidez junto con el ángulo de reposo es la prueba de compresibilidad la compresibilidad representa el cambio de densidad de un lecho en función de la presión normal a la cual está sometido un polvo.

Se ha demostrado experimentalmente que para una gran variedad de polvos alimentarios, sometidos a presiones relativamente pequeñas (hasta 5 Kg/cm^2), puede aplicarse la siguiente ecuación.

$$D = a + b \log P$$

D = densidad del lecho (g/cm^3);

P = presión normal (Kg/cm^2);

a = constante, y b = constante que representa la compresibilidad.

Así, la magnitud de la compresibilidad puede caracterizar cuantitativamente diferentes polvos y puede servir como propiedad de referencia para detectar alteraciones del producto. (Moreyra, 1991)

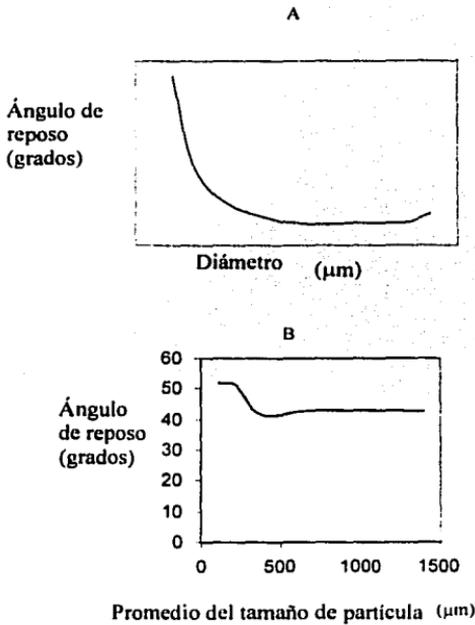


Fig. 36 A) ángulos de reposo para diferentes tamices.
 B) ángulo de reposo como una función del promedio del tamaño de partícula.

El ángulo de reposo y los valores de compresibilidad son una indicación de las propiedades de flujo.

Valores de ángulos de reposo $\leq 30^\circ$ generalmente indican un material que fluye libremente, ángulos $\geq 40^\circ$ sugieren un material con poca fluidez.

En general el ángulo de reposo se incrementa cuando se reduce el tamaño de partícula y este efecto es menos considerable en un rango de tamaño de partículas pequeño. Mientras que cuando el promedio de tamaño de partícula se incrementa el ángulo de reposo se mantiene casi constante y no cambia.

Los factores que afectan el ángulo de reposo son la distribución de tamaño, (Svarovsky, 1987), la rugosidad de la superficie de las partículas, el espacio nulo de la cama de polvos (Moreyra, 1991) y el contenido de humedad. Este efecto se muestra en las gráficas Fig. 36 (A) y (B)

Un método rápido para determinar la conducta de las partículas es por medio del ángulo de reposo. Si el sólido se deja correr a través de una boquilla en un plano horizontal que forma un acumulado cónico el ángulo formado entre el acumulado cónico y la horizontal es el ángulo de reposo, como en el caso de embudo fijo y cono libre cuando se determina de esta manera, algunas veces se identifica como ángulo de reposo o dinámico.

En la practica, el acumulado no es exactamente cónico y existen irregularidades en la superficie inclinada, además existe una tendencia de las partículas grandes de caer hacia debajo de la superficie y acumularse en la base esto da un ángulo de reposo grande en la parte superior y un ángulo de reposo pequeño en la parte inferior.

El ángulo de reposo varia desde 20° para sólidos de flujo libre hasta 60° para sólidos con pocas características de flujo, en casos extremos en los sólidos con un alto aglomerado, los ángulos de reposo obtenidos son de cerca de 90°. El material con partículas libres más pequeñas a 100 μm tienen un ángulo de reposo bajo.

El problema es que el ángulo a veces depende del diámetro del acumulado y provoca una mayor inclinación y por lo tanto diámetros pequeños produciendo un pico del acumulado.

Probablemente el único procedimiento adoptado por algunas industrias es el descrito para el aluminio.

El aparato consiste en un embudo de vidrio o polietileno, montado sobre el tripode (o un puente rígido, como se observa en la Fig. 37) El fondo del embudo es de 5.2 cm colocado sobre un plato de metal o de madera. El plato tiene una serie de círculos concéntricos grabados en la superficie, alineada con el centro del embudo, los diámetros de los círculos dan los diferentes ángulos de superficies cónicas generados en el fondo del embudo normalmente se seleccionan los ángulos con una diferencia de 2 grados, grabados en los círculos correspondientes.

La altura del embudo se verifica por medio de una medida y la alineación se inspecciona visualmente con el centro de los círculos concéntricos de la base.

Se coloca la muestra en el embudo y se agita si es necesario, la muestra forma un cono en el plato y la punta del cono se sella previniendo que más muestra pase a través.

El ángulo de reposo es determinado por medio de la marca graduada o por el círculo que corresponde a la circunferencia de la base del acumulado, normalmente se evalúan cuatro puntos diferentes de la circunferencia y se promedian para determinar el ángulo. (Svarovsky, 1987)

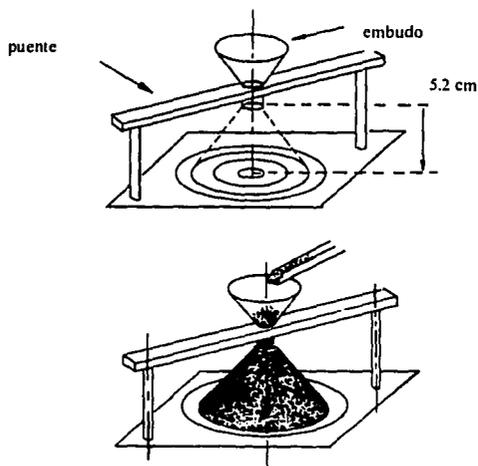


Fig. 37. Medición del ángulo de reposo.

La medición de las fuerzas de fricción entre las partículas, es el ángulo de fricción. Para la medición del ángulo de fricción se utiliza un tubo vertical abierto por la parte superior, con un pistón ajustado en la base, como se observa en la Fig.38, el pistón puede moverse libremente hacia arriba pero cuando se excede la fuerza no existe movimiento en el pistón. Con la movilidad de los sólidos en el centro, se obtiene el radio, o sea la longitud del diámetro, que es a la vez la tangente del ángulo de fricción.

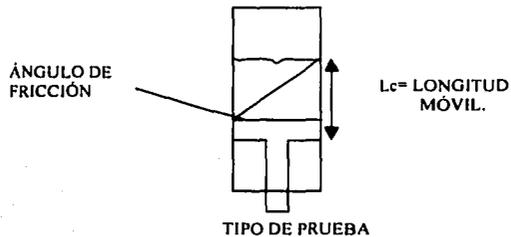


Fig. 38. Ángulo de fricción tubo de prueba

Si la presión de la base de la columna de sólidos es medida como una función de la profundidad, se encuentra un incremento aproximadamente lineal con la altura sobre un cierto punto crítico. Graficando la altura contra la presión ejercida en la base como se observa en la Fig. 39

El punto que es discontinuo en la curva dado por:

$$L_c/dt = \tan \alpha$$

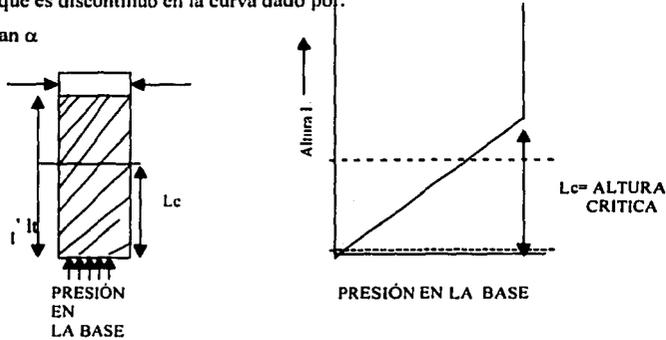


Fig. 39 Ángulo de fricción. presión en la base de la columna

3.5 Flujo de sólidos a través de orificios

La proporción de descarga de partículas sólidas es controlada por el tamaño del orificio o de la abertura en la base de la tolva.

El flujo de sólidos a través de un orificio depende de la habilidad de las partículas a dilatarse en la región de la abertura.

La proporción de descarga de sólidos a través del orificio de salida es independiente de la profundidad de los sólidos en la tolva, y es proporcional al diámetro efectivo del orificio. El diámetro efectivo es el diámetro del orificio menos una corrección, la cual varía entre 1 y 1 1/2 veces el diámetro de la partícula.

Richardson, 1980 ha desarrollado una ecuación para el flujo a través de un orificio.

Esto da:

$$G = \frac{\pi}{4} \rho_s d_{eff}^{2.5} g^{0.5} \left\{ \frac{1 - \cos \beta}{2 \sin^3} \right\}^{0.5} \quad (3.1)$$

En donde:

- G = Es la proporción de flujo de masa.
- ρ_s = Es la densidad de los sólidos particulados.
- d_{er} = Es el diámetro efectivo del orificio = orificio - diámetro de partícula
- g = Es la aceleración de la gravedad.
- β = Es el ángulo agudo entre la pared del cono y la horizontal.

3.5.1 Flujo en tolvas de almacenamiento.

Al observar los modelos de flujo que ocurren en las tolvas de almacenamiento mientras la descarga toma lugar, muestran que existen 2 tipos de tolvas y son:

- Flujo de centro (o algunas veces flujo de embudo)
- Flujo másico.

Los diagramas (Fig. 40) muestran una sección transversal a través de la tolva, consiste en un cono que es delimitado en la parte superior por un cilindro, el cual ha sido llenado con polvo.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Las líneas horizontales son hechas por partículas coloreadas, que permiten la visualización de las partículas y del modelo de flujo. Cuando una pequeña porción del polvo sale de la tolva, se observa una región claramente definida en la cual ocurre un movimiento hacia debajo de las partículas.

En las regiones que se encuentran fuera del centro, cerca de las paredes el material no ha comenzado a moverse, la colocación de las partículas coloreadas continua en su posición original. La superficie es cónica. Cuando el contenedor se encuentra casi vacío todavía existe material en la tolva el cual no ha sufrido ninguna modificación. El flujo en la tolva es por lo tanto caracterizado por la existencia de espacios muertos mientras la descarga toma lugar.

El flujo másico en la tolva, es definido como el flujo en el cual cada partícula se encuentra en movimiento. cuando el material comienza a descargarse de la tolva, las partículas en contacto con la pared se deslizan hacia abajo.

Se muestra una serie de fotografías en la Fig. 40 que muestran el comportamiento de flujo durante la descarga. La figura (a) muestra la tolva, cuando ha sido llenada con polvo. En la figura (b) se observa el comportamiento de flujo en el centro de la tolva. Las líneas de las partículas coloreadas cerca de lo alto de la superficie se mueven hacia abajo pero en forma horizontal. La transición entre el cilindro y el cono es el gradiente de velocidad, las partículas cercanas a la línea central se mueven más rápidamente que las que se encuentran cerca de la pared. El flujo másico en la tolva, es por lo tanto caracterizado por la ausencia de espacios muertos.

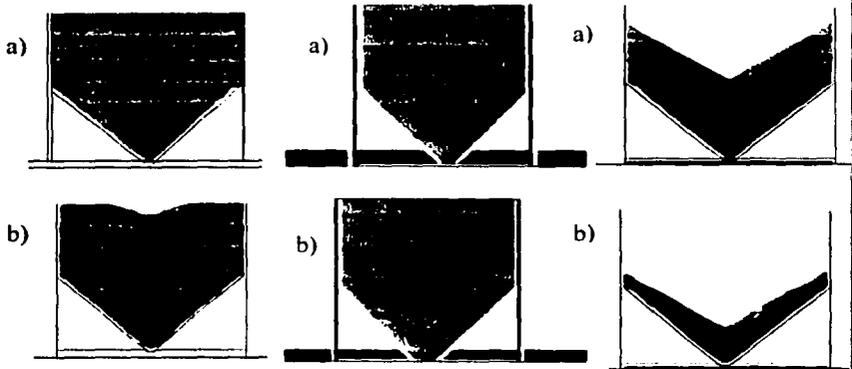


Fig.40 Flujo en tolvas de almacenamiento

3.6 Tipos de flujo y expresión de fluidez

La Tabla 12 clasifica a los tipos de flujo de polvos basado en la energía ejercida en las partículas:

- 1) Flujo gravitacional.
- 2) Flujo forzado mecánicamente.
- 3) Flujo por vibración.
- 4) Flujo por compresión.
- 5) Flujo fluidizado.

Flujo Gravitacional

El flujo de los depósitos de alimentación o a través de un orificio se considera a menudo que expresa la fluidez de un polvo. En este caso la magnitud y uniformidad de la velocidad de flujo, se considera como el criterio de fluidez. El comportamiento de flujo y la segregación también se relacionan con la fluidez del polvo.

Tabla 12. Tipos de flujo y expresión de la fluidez:

TIPO DE FLUJO	PROCESO / FENÓMENO	EXPRESIÓN DE FLUIDEZ
FLUJO GRAVITACIONAL	Descarga de una caja, tolva, cascada, vaso de arena, mezclador, compresión.	Proporción de descarga, ángulo de fricción en la pared, ángulo de reposo, abertura crítica de descarga.
FLUJO FORZADO MECÁNICAMENTE.	Mezclado de polvo, banda transportadora de cadena, transportador de tornillo, alimentador de mesa, mezclador de cinta, alimentador rotatorio, extruder	Ángulo de fricción interna, ángulo de fricción en la pared, resistencia al mezclado.
FLUJO POR COMPRESIÓN	Aglomerado, entabletado.	Compresibilidad, ángulo de fricción en la pared, ángulo de fricción interna.
FLUJO POR VIBRACIÓN.	Alimentador por vibración, banda transportadora por vibración.	Ángulo de reposo, proporción de descarga, compresibilidad, densidad del conglomerado.
LECHO FLUIDIZADO.	Lecho fluidizado, transporte neumático, deslizamiento de aire, secador de vibración aireado.	Ángulo de reposo, velocidad de fluidez mínima, resistencia a la aireación, viscosidad aparente.

(Hawkins, 1993)

Flujo Gravitacional.

En la Fig. 41 se muestra un equipo, para evaluar la fluidez. Aun cuando la proporción de flujo es alta, no puede considerarse un flujo con una fluctuación grande como una medida de fluidez.

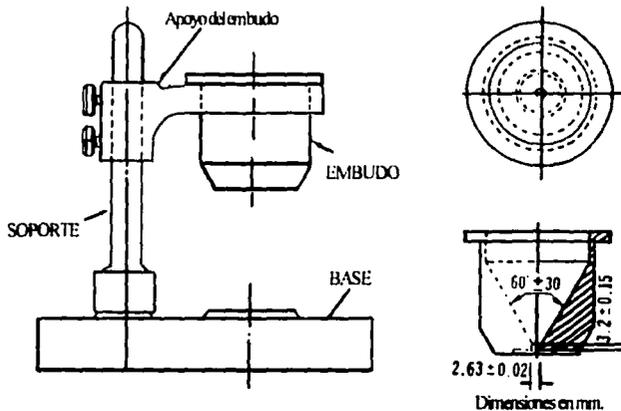


Fig. 41. Dispositivo para la medición de fluidez

El dispositivo consta de un doble embudo (un embudo exterior y un embudo interior) con una abertura. El embudo interno forma cónica en donde es colocado el polvo, se abre la abertura y se deja correr el polvo sobre la base formando un acumulado. Los polvos que son cohesivos tienden a formar puentes cerca de la salida del contenedor. La velocidad de descarga del polvo es directamente proporcional al producto de la altura del acumulado sobre la superficie y la raíz cuadrada del diámetro del orificio.

Representado como:

$$Ma h \sqrt{D_o} \quad (3.2)$$

En donde:

M = es la proporción de descarga de la masa.

h = altura del acumulado sobre nivel de la superficie,

Do = diámetro del orificio.

El tamaño de la abertura mínima corresponde a la condición que es crítica para el flujo del polvo y este puede ser un indicador de la fluidez por medio del ángulo de reposo.

El ángulo de reposo se define como el ángulo que forma el plano horizontal con la superficie de un acumulado de polvo bajo el esfuerzo del campo gravitacional.

Existen cuatro métodos principales para determinar el ángulo de reposo como se muestra en la Fig. 42

- 1) Embudo fijo y cono libre.
- 2) Cono de cama fija.
- 3) Caja inclinada.
- 4) Cilindro giratorio.

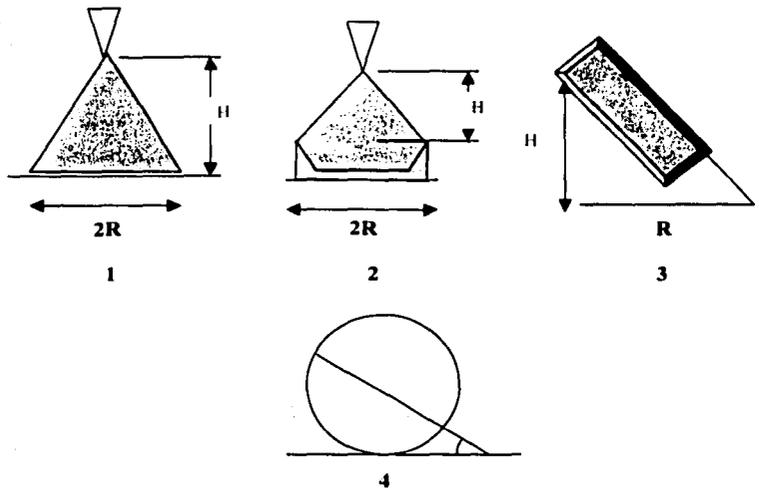


Fig. 42. Métodos para la medición del ángulo de reposo

En el método de embudo fijo y de cono libre, se asegura el embudo en la punta, esto esta dado por una altura H.

En el método 1 y 2 el polvo se deja correr a través del embudo hasta que la punta del acumulado cónico sólo toca la punta del embudo entonces podemos aplicar las siguientes formulas:

$$\text{Tan} \alpha = \frac{H}{R} \quad \text{ó} \quad \alpha = \arctan \frac{H}{R} \quad (3.3)$$

En donde α es el ángulo de reposo, H es la altura, R es la mitad de la distancia de la base.

En el método de cono fijo que es parecido al método anterior lo único que cambia es la forma de la base. El polvo es depositado en el centro de la base desde el embudo verticalmente hasta formar un cono máximo y obtener la altura H . El ángulo de reposo es calculado con la expresión anterior.

En el método de caja inclinada, una caja rectangular es llenada con polvo hasta que el contenido comienza a deslizarse formando un ángulo con la horizontal y aplicando la fórmula anterior. En el método del cilindro, un cilindro gira horizontalmente, cuando la mitad se ha llenado con polvo, esto se toma como ángulo de reposo.

Los ángulos determinados por los tres primeros métodos son llamados ángulos estáticos, el ángulo obtenido por el método del cilindro giratorio es comúnmente llamada ángulo cinético. Usualmente el ángulo cinético es menor que el ángulo estático.

El ángulo de reposo es utilizado para partículas $\geq 150 \mu\text{m}$. En este rango de tamaño, los efectos de cohesividad pueden ser mínimos y el coeficiente de fricción puede ser grande dependiendo sobre todo del comportamiento del polvo.

El valor del ángulo de reposo para un material dado depende de las propiedades superficiales de las partículas que afectan la fluidez. Sin embargo el flujo de partículas gruesas puede ser determinado por medio de la disposición de las partículas. Por esta razón un auxiliar para determinar la fluidez junto con el ángulo de reposo es la prueba de compresibilidad. El ángulo de reposo y los valores de compresibilidad son una indicación de las propiedades de flujo.

Valores de ángulos de reposo $\leq 30^\circ$ generalmente indican un material que fluye libremente, ángulos $\geq 40^\circ$ sugieren un material con poca fluidez.

Flujo Forzado Mecánicamente (Linoya, 1991)

El flujo de polvo por medio de una fuerza mecánica se ha estudiado en relación al torque, utilizando varios tipos de viscosímetros rotatorios, con diversas hojas agitadoras, como viscosímetros Stomer, Couette, Green y Mac Michael; el equipo se muestra en la Fig. 43.

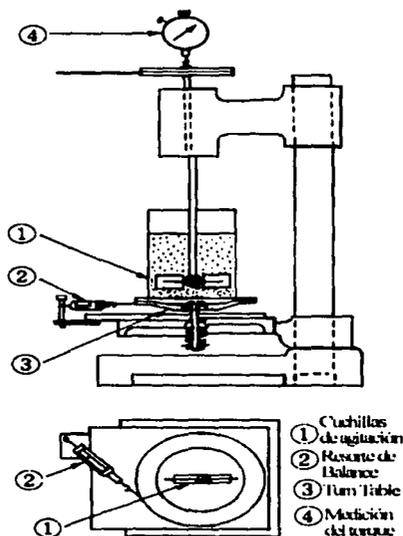


Fig. 43. Equipo para la determinación de Torque

La idea de medir la viscosidad aparente de los polvos en diferentes estados de aireación no es nueva, varios viscosímetros han sido utilizados como son: viscosímetros rotatorios o vibratorios, viscosímetros de tubo.

El viscosímetro Couette, se basa en el principio del método de fluidización del polvo de cilindros concéntricos, con ambos cilindros rotando independientemente; ofrece la posibilidad de generar un amplio rango de esfuerzos que van desde cero hasta llevar acabo una fluidización completa. Rodando ambos cilindros independientemente, se puede crear y controlar un modelo de esfuerzos en el espacio anular. El aire fluidizado se introduce a través de un distribuidor estacionario.

Los experimentos realizados mostraron una asimetría en los resultados de la rotación, el cilindro exterior tiene un mayor efecto en el comportamiento de la fluidización que el cilindro interno. La expresión de la fluidez se obtiene por medio del ángulo de fricción en la pared.

Flujo Por Compresión. (Linoya, 1991)

Una prueba de compresión también da una medida de la fluidez de un polvo. Un número de ecuaciones han sido propuestas para la relación entre la acción de la presión externa que actúa en el polvo y el cambio de volumen. Una ecuación experimental típica relaciona a la velocidad de reducción de volumen expresada como C a la presión aplicada P (Pa) La expresión utilizada de la fluidez se obtiene por medio de la compresibilidad, el ángulo de fricción en la pared y el ángulo de fricción interna.

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{ab} + \frac{P}{a} \quad (3.4)$$

En donde a y b son constantes, y " a " es reportado como la fluidez del polvo. Ver Tabla 13 para algunos valores de fluidez.

Tabla 13 Valores de Fluidez

Tamaño de partícula (μm)	Densidad de la partícula (g/cm ³)	a	b
74 - 105	2.23	13.5	5.13
105 - 149	2.22	10.0	3.03
149 - 210	2.04	12.0	2.63
210 - 250	2.06	12.0	2.78
250 - 297	2.07	11.0	1.45

(Linoya, et al. 1991)

Flujo Por Vibración

La vibración cambia la estructura del empaque de la cama del polvo y por lo tanto se produce un cambio en la fluidez. Linoya, Et al (1991) propuso la siguiente relación experimental entre la proporción del flujo de masa a través de tamices y aberturas de los tamices.

$$\frac{W_s}{\rho_s} = kD_s^n D_p^{-2} \quad (3.5)$$

En donde W_s (ton/h) es la velocidad del flujo, ρ_s (ton /m³) es la densidad específica de la partícula, D_s (mm) la abertura del tamiz. D_p (mm) el diámetro de partícula y n es una constante y representa el índice de cizalla. El factor k , llamado índice de fluidez por tamizado, expresa la facilidad con la cual las partículas pasan a través de tamices y es considerado como una medición de la fluidez bajo condiciones dinámicas.

En pruebas mecánicas la condición de balance se obtiene de la línea de fluencia de las pruebas de cizalla con la celda Jenike. La fluidez esta definida en base a la línea de fluencia, e indica la condición en donde la fuerza de equilibrio es pérdida y está fuertemente relacionado al llenado en el transporte neumático o en la toma del contenedor. Jenike definió el esfuerzo de tensión f (kPa) y el esfuerzo de compactación máximo σ_1 (kPa) de dos círculos Mohr que entran en contacto con la línea de fluencia y se llamó velocidad (σ_1/f) de la función de flujo FF, el cual se considera como una medida de fluidez.

3.7 Influencia del contenido de humedad y temperatura.

El contenido de humedad juega un papel muy importante en todos los aspectos del manejo de polvos.

El contenido de humedad (también "contenido de agua") es en un principio muy simple de medir: es la cantidad de agua por unidad de masa del polvo en conglomerado, como un porcentaje o fracción a través de la masa (o peso) El contenido de humedad puede, obtenerse en base seca (por ejemplo por unidad de masa de un polvo seco) o en base húmeda. (Svarovsky, 1987)

El agua entre las partículas es llamada humedad libre, aunque la humedad dentro de los poros de las partículas es conocida como humedad inherente.

La muestra puede secarse bajo condiciones ambiente por medio de aire natural, y el resultado es el contenido de humedad del aire - seco que, obviamente, no incluye toda la humedad en el polvo (humedad inherente) (Svarovsky, 1987)

La mayor parte del agua se pierde durante la molienda de la muestra, mientras que el contenido de agua adhesiva aumentará debido al incremento en el área superficial.

La palabra humedad se usa para indicar: el agua total contenida en una muestra, la humedad total, humedad, o humedad higroscópica.

1. Humedad higroscópica: contenido de agua que pierde una muestra mantenida en aire seco o a una humedad constante por un largo periodo.
2. Humedad (contenido de agua): cantidad de agua que se adsorbe en la muestra a ciertas condiciones constantes. Generalmente el contenido de agua se refiere a la cantidad de agua medida por el método de determinación de humedad para un aire seco o una muestra a humedad constante.
3. Humedad total: es la suma del contenido de agua y la humedad higroscópica. Generalmente, esta corresponde a la cantidad de agua perdida durante el secado a 373 o 378 K excepto para muestras que incluyen agua combinada.
4. Contenido de agua total: cantidad de agua, incluyendo la humedad total más el agua de los límites. (Linoya, 1991)

El manejo adecuado de polvos requiere cierto control de las condiciones ambientales en las que se les mantiene, fundamentalmente humedad y temperatura. Una humedad excesiva en el ambiente da lugar a la absorción de agua por las partículas y a la disolución de componentes solubles; la solución resultante forma, entonces, puentes líquidos, que, por posterior disminución de la humedad, se convierten en uniones sólidas compuestas, fundamentalmente del soluto que se disolvió originalmente. Estas uniones pueden causar un grave deterioro de la presentación y de las propiedades de flujo del polvo correspondiente.

Las temperaturas altas dan lugar principalmente, a dos efectos: plastificación de materiales ricos en azúcares y fusión de componentes grasos. En estos casos se origina, asimismo, puentes líquidos, que han sido llamados puentes termoplásticos y puentes viscosos respectivamente. Aun cuando son de naturaleza distinta, estos puentes pueden también convertirse, por resolidificación, si la temperatura decrece, en uniones sólidas.

El grado de compactación de los polvos es también un factor muy importante a considerar cuando se manejan grandes volúmenes, como ocurre al almacenar en silos y tolvas industriales.

En estos casos, el peso de la masa incrementa la presión, y, por lo tanto, el grado de compactación del polvo. Esto, a su vez, promueve interacciones físicas entre las partículas, como atracciones de Van der Waals.

Cuanto más tiempo está un polvo bajo condiciones ambientales desfavorables, mayor es la posibilidad de que se originen problemas como los antes mencionados.

La Fig. 44 muestra la relación existente entre la cohesión y el tiempo en el que se produce la aglomeración masiva, y, por tanto, el endurecimiento del producto, en el caso de polvo de sacarosa. Existe evidencia de que en otros polvos la tendencia de esta relación es muy similar. (Peleg, 1984)

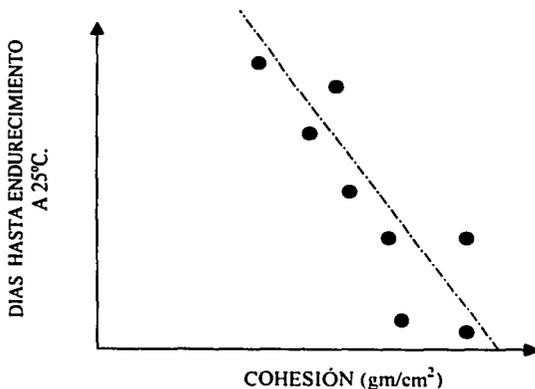


Fig. 44. Relación entre la cohesión y el tiempo de aglomeración masiva (endurecimiento) en sacarosa en polvo.

3.8 Metodología propuesta para la caracterización de sólidos particulados

Para realizar una caracterización de sólidos particulados, primeramente debemos realizar un muestreo para obtener una muestra representativa del polvo, el muestreo puede realizarse manual o mecánicamente, lo mas recomendado es realizarlo por medio de muestreo mecánico porque colecta la muestra con una mayor precisión.

Posteriormente debemos realizar un tamizado que nos ayudara en la caracterización de las partículas por medio del tamaño de la abertura del tamiz, auxiliándonos del análisis granulométrico y de los parámetros estadísticos.

Por medio del análisis granulométrico se obtienen los histogramas de frecuencia que representan la fracción masa retenida entre los límites de los tamices en función de la abertura del tamiz, y también se obtienen las curvas de frecuencia por medio de las cuales podemos obtener la distribución del tamaño de partícula y así conocer la forma, tamaño y dimensión de las partículas.

Los parámetros estadísticos nos auxiliarán para conocer la distribución de tamaño de partícula y saber si el material es mas o menos homogéneo.

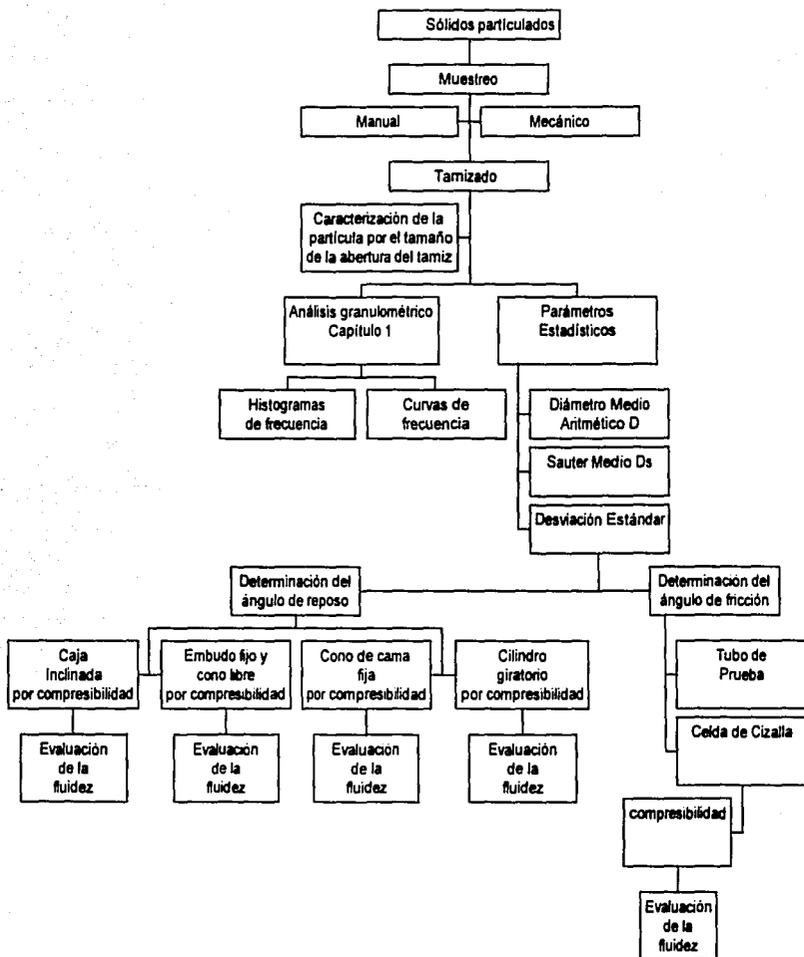
Una vez obtenidos los puntos anteriores podemos llegar a la determinación de los parámetros que nos ayudarán para la determinación de fluidez.

El primer parámetro es la determinación del ángulo de reposo que puede obtenerse por 4 métodos diferentes como son: Caja inclinada, embudo fijo y cono libre, cono de cama fija y cilindro giratorio, éste ángulo es utilizado para partículas $\geq 150 \mu\text{m}$. ángulos de reposo $\leq 30^\circ$ indican un material que fluye libremente, ángulos $\geq 40^\circ$ indican un material con poca fluidez. Un auxiliar para determinar la fluidez junto con el ángulo de reposo es la prueba de compresibilidad ya que representa el cambio de densidad d un lecho en función de la presión a la cual es sometido un polvo.

El segundo parámetro es el ángulo de fricción que puede obtenerse por 2 métodos, por medio del tubo de prueba y de la celda de cizalla de Jenike.

Todos los métodos utilizados para realizar la medición de fluidez en sólidos particulados utilizan la compresión del polvo. Esto se muestra en el siguiente cuadro.

Metodología propuesta para la caracterización de sólidos particulados



CONCLUSIONES

Los objetivos planteados para la realización de esta tesis fueron cumplidos, se realizó la recopilación bibliográfica para el estudio e investigación de sólidos particulados apoyándose de un análisis por medio de tamices, un análisis estadístico, un muestreo adecuado para conocer como evaluar la fluidez de un material en polvo.

Es importante fomentar la investigación y el desarrollo de procesos más eficientes y adaptables para la industria de alimentos en polvo, que ha experimentado una expansión notable, debido a las ventajas que ofrece la utilización y el manejo de materiales en polvo, fundamentalmente en lo que respecta a la facilidad de conservación a largo plazo de los mismos y a la amplia gama de productos que pueden fabricarse y al bajo costo de su transporte y de su almacenamiento.

La gran variedad en cuanto a la naturaleza y composición química de los diferentes polvos usados en la industria de alimentos da lugar a que su comportamiento, especialmente en lo que se refiere a flujo dependa de varios factores. Estos factores pueden ser inherentes al polvo mismo, como: propiedades de superficie, tamaño de partícula, fuerzas de cohesión entre partículas, etc. o pueden ser factores externos como temperatura, presión humedad.

Las propiedades como la densidad y compresibilidad dependen de las fuerzas de atracción entre partículas y permiten estimar cambios en el valor de cohesión y por tanto en las propiedades de flujo.

Los polvos usados en la industria de alimentos comúnmente son cohesivos y por lo tanto sus propiedades de flujo están básicamente determinadas por la magnitud de la cohesión.

La medida del ángulo de reposo de un polvo se ha usado como un indicador de las propiedades de flujo. El ángulo depende de la cohesión y de la fricción entre partículas pero también de factores adicionales, como son las condiciones de impacto.

En cuanto a los equipos para la determinación de las propiedades inherentes al comportamiento de los materiales en polvo se puede decir que aunque la literatura menciona a algunos de ellos como pueden ser reómetros, celdas específicas como la de Jenike, etc., la disponibilidad de los mismos no esta al alcance de muchas empresas, aunque se debe seguir investigando en relación a las propuestas de métodos empíricos que permitan la evaluación de las propiedades mencionadas, tal como es el caso de la fluidez.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Badger, W. (1990). Introducción a la Ingeniería Química, Mc. Graw Hill, México.
- 2) Beer, F. (1993) Mecánica de materiales, 2ª. Edición. Mc. Graw-Hill, Colombia.
- 3) Fayed, M. (1990). Handbook of Powder Science and Technology, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- 4) Fayed Et al, (1984). Powder science technology, Van Nostrand Reinhold Company, New York
- 5) Fonner, Anderson and Banker (1990). Characterization of Granulations, Interscience, New York.
- 6) Geankoplis C.J. (1993). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, Edit Continental S.A. de C.V. México.
- 7) Hawkins A. (1993). The Shape of Powder-Particle Outlines, Jhon Wiley & Sons inc. England
- 8) Linoya K. (1991). Powder Technology Handbook, Marcel Dekker, Inc. New York.
- 9) Mc Cabe W. (1982). Unit Operations of Chemical Engineering, Mc Graw-Hill.
- 10) Moreyra R. (1991). Propiedades Físicas Relacionadas con el Flujo de Alimentos en Polvo. University of Massachusetts, E.E.U.U.
- 11) Ocampo (1990). Testing and Characterization of Powders and Fine Particles, Powder Technolog., 45.

Bibliografía

- 12) Peleg, S. (1984). Multiple resolution texture analysis and classification, Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 6.
 - 13) Perry R. (1992). Biblioteca del Ingeniero Químico 6º Ed. Mc Graw-Hill, México.
 - 14) Rhodes, M.J. (1990). Principles of Powder Technology, John Wiley & Sons, Great Britain.
 - 15) Rietema, K. (1992). The Dynamics of Fine Powders, Elsevier Applied Science, London and New York.
 - 16) Richardson J.F. (1990). Chemical Engineering, Pergamon Press, Gran Bretaña.
 - 17) Rumpf, H (1990). Particle Technology, Chapman & Hall, London.
 - 18) Svarovsky, L. (1987). Powder Testing Guide, Elsevier Applied Science, London.
 - 19) Washington, (1992). Particle size analysis in pharmaceuticals and other industries, Ellos Horwood Limited, England.
 - 20) Williams, J.C. (1998). The mixing of dry powders, Powder Technol., 2.
- Páginas de Internet
- 21) Leroy, (2000) www.science.ubc.ca/geol307/shear.html
 - 22) Dutch, (1998) www.2ing.cl/icm2312/apuntes/circulo.html
 - 23) www.imp.mtu.edu/matchar/part_mor.html
 - 24) www.aiche.org/aiche/continuing_education/courses/238.html
 - 25) www.tees.ac.uk/sst/res1_4.htm
 - 26) www.aiche.org/aiche/continuing_education/courses/032.html