

Capítulo 13. ALMACENAMIENTO. SILOS

13.1. Introducción

En las industrias de alimentos existen muchos materiales que pueden deteriorarse si son almacenados en el exterior sin protección. Los contenedores para almacenar productos son llamados generalmente silos. Los silos poseen en el fondo una tolva de descarga, la cual debe diseñarse con cuidado para lograr una descarga del producto controlada. Normalmente estos recipientes son llenados por el tope y descargados por el fondo.

Muchos polvos y partículas no fluyen uniformemente causando dificultades tales como la falta de flujo, segregación, caudales de descarga inestables, etc. Por esta razón, en primer lugar algunas propiedades de flujo de los materiales serán discutidas, para tener la información necesaria para comprender el diseño de silos, que se verá a continuación.

13.2. Algunas propiedades de flujo de sólidos

Las características de flujo de sólidos son de gran importancia en muchas situaciones de transporte y almacenamiento. Cuando un material particulado es almacenado, se tiene que asegurar que el producto puede ser recuperado con las características originales.

Los sólidos en flujo son sometidos a fuerzas de:

- Gravedad
- Fricción
- Cohesión (fuerzas interparticulares)
- Adhesión (atracción entre las partículas y las paredes)

Es necesario entonces identificar las propiedades de flujo claves para garantizar la fluidez del material y tener nociones básicas de su medición.

13.2.1. Propiedades de falla

Las propiedades de falla tienen en cuenta el estado de compactación de la muestra, el cual puede ser afectado notablemente por ejemplo por la humedad del ambiente; por lo tanto el tiempo de consolidación en una dada condición puede afectar estas propiedades. Las propiedades que describen la condición de falla son:

- Ángulo de fricción con la pared (ϕ): Es equivalente a la fricción entre dos superficies sólidas, sólo que en este caso una de las superficies es el sólido. La fricción con la pared de los recipientes donde el sólido está contenido hace que parte del peso del material sea soportado por el contenedor.

- Angulo efectivo de fricción interna (δ): Es una medida de la fricción entre las partículas, la cual es función del tamaño, forma, rugosidad y dureza del material sólido.
- Cohesión: Es una función de la atracción entre partículas, las cuales tienden a prevenir el desplazamiento entre ellas.

Las propiedades de falla se miden en celdas de corte, como por ejemplo la celda que se muestra en la Figura 13.1. Los experimentos llevados a cabo en esta celda son representativos de los esfuerzos de corte a los que se ven sometidos los sólidos durante la operación de un silo. La celda consta de una base y un anillo que se coloca sobre la base, ambos dispositivos están inicialmente sujetos por tornillos. La celda se llena con el sólido que se desea analizar, luego la tapa se coloca sobre el anillo. Posteriormente se aplica una carga normal (V) a la superficie de la tapa (por ejemplo una pesa). Luego se liberan los elementos que mantienen solidarios el anillo y la base, para comenzar a aplicar lateralmente una tensión.

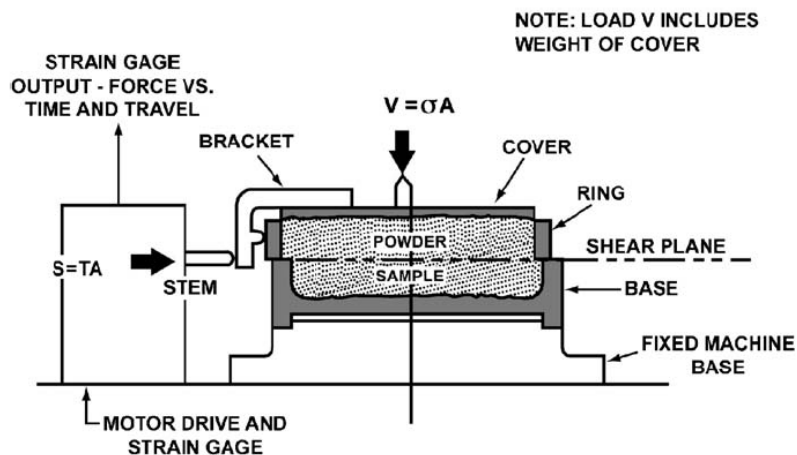


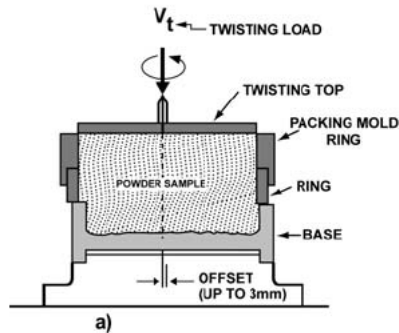
Figura 13.1. Celda de corte de Jenike

El experimento se lleva a cabo en distintas etapas que se describen en la Figura 13.2.

En la etapa de consolidación, para la carga V elegida, la tensión de corte en función del tiempo alcanza un valor de estado estacionario, que denominaremos E .

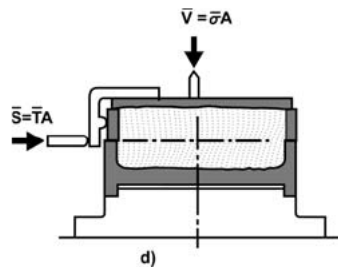
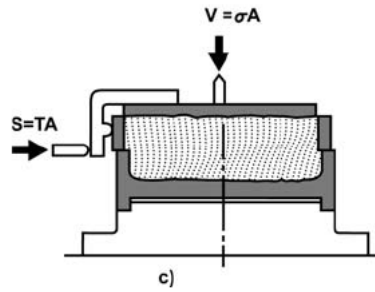
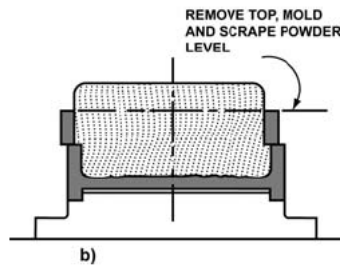
Luego de la etapa de consolidación, se utilizan progresivamente menores cargas normales. Para cada carga se aplica la tensión de corte y se registra. El valor de la tensión se registra hasta el punto que esta adquiere un máximo valor, el cual se sigue de una caída abrupta en el valor de la misma. En ese punto se ha producido un plano de deslizamiento.

Con los datos experimentales obtenidos de este experimento se obtienen gráficos de tensión de corte versus carga normal.



a) Preconsolidation – With a packing ring in place, the cell is filled, a twisting top is placed on the sample, a force V_t is applied to the top while it is given a number of oscillating twists. The twisting top and force are removed and the powder surface scraped level with the shear ring.

b & c) Consolidation and preshear – A shear cover is placed over the powder sample and a selected normal force V is applied. A shear force is then continuously applied until it reaches a steady-state value indicating plastic flow. The shear force is then interrupted and the stem retracted



d) Shear - The normal force V is replaced by a smaller force \bar{V} and the shearing force is reapplied until the stress / strain peaks and falls off. Indicating failure plane in the sample and a point on the yield locus. This procedure is repeated several times with fresh samples, each consolidated as above but sheared with a progressively smaller normal force.

Figura 13.2. Etapas en el experimento de Jenike.

En la Figura 13.3 se presentan los resultados típicos obtenidos para un material que fluye libremente, por ejemplo arena. Del grafico de τ vs σ es posible determinar el ángulo de fricción interna.

La Figura 13.4 muestra los puntos experimentales obtenidos en una celda tipo Jenike para un material particulado cohesivo. La funcionalidad ya no es una recta, y se observa claramente el punto E de consolidación. Curvas similares a la presentada en

la Figura 13.4 se podrían obtener si se parte de un estado de consolidación distinto (i.e. con una densidad de lecho distinta). Si el material es cohesivo, la cohesividad (C) puede determinarse de la ordenada al origen. Sin embargo, no es posible determinar directamente el ángulo de fricción interna.

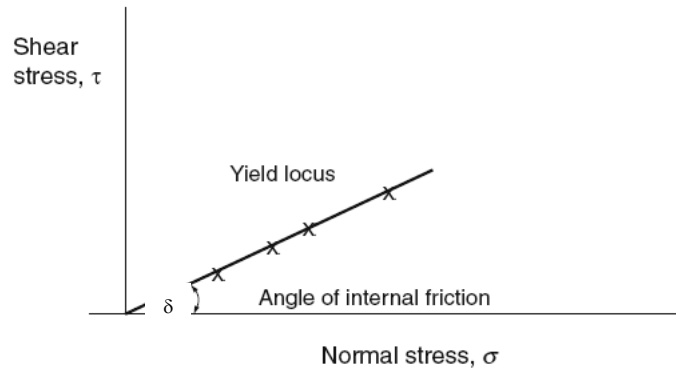


Figura 13.3. Partículas que fluyen libremente, por ejemplo arena.

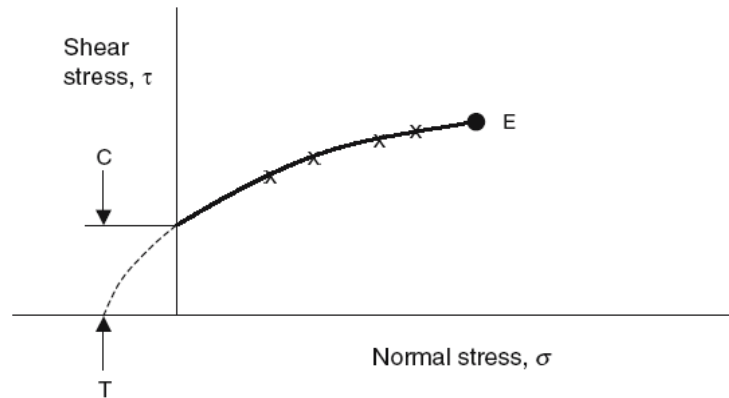


Figura 13.4. Partículas cohesivas.

Si se quiere obtener el ángulo de fricción con la pared, el dispositivo de Jenike es como el que se muestra en la Figura 13.5.

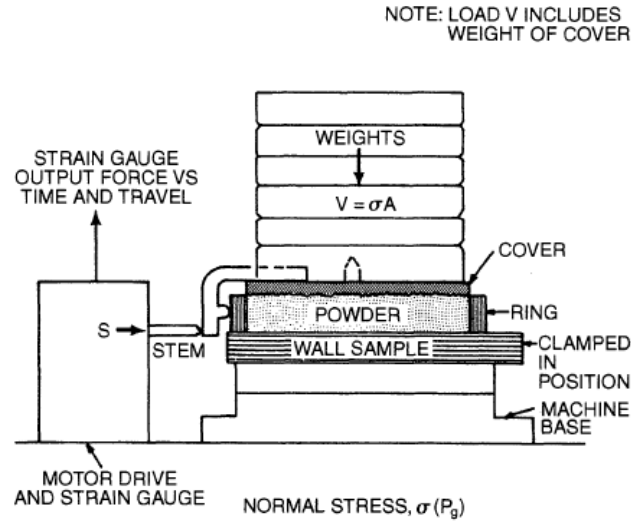


Figura 13.5. Test para determinar el ángulo de fricción con la pared.

Estos gráficos junto con los círculos Mohr son de importancia al momento del diseño de los silos. Los gráficos de Mohr que veremos a continuación, permiten el cálculo del ángulo de fricción interna para los materiales que son cohesivos, caso en el cual el gráfico de τ vs σ no da una línea recta.

13.2.2. Círculo de Mohr

Se puede representar la tensión normal (σ) y la tensión de corte (τ) en un plano que describe un círculo, el cual se denomina círculo de Mohr y se presenta en la Figura 13.6.

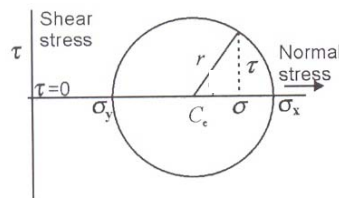


Figura 13.6. Círculo de Mohr.

El centro del círculo (C_e) puede ser expresado en función del radio como:

$$C_e = \sigma_y + r \quad (13.1)$$

donde σ_y es el valor de tensión normal menor donde corta el círculo de Mohr el eje x, y r es el radio del círculo. Este radio puede determinarse como:

$$r = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \quad (13.2)$$

donde σ_x es el valor de tensión normal mayor donde corta el círculo de Mohr el eje x.

Usando el teorema de Pitágoras (ver Figura 13.6) resulta:

$$r^2 = \tau^2 + (\sigma - C_e)^2$$

$$\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 = \tau^2 + (\sigma - C_e)^2 \quad (13.3)$$

donde σ es un dado valor de tensión normal. La ecuación (13.3) representa la ecuación del círculo de Mohr que tiene el centro ubicado en el valor de tensión de corte igual a 0. Reemplazando la definición de C_e en la ecuación (13.3) y despejando la tensión de corte resulta:

$$\tau^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 - \left(\sigma - \sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right)^2$$

$$\tau^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 - \left(\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right)^2 \quad (13.4)$$

La ecuación (13.4) permite relacionar la tensión normal con la de corte. La pregunta que sigue es, las tensiones normal y de corte en un plano pueden ser representadas por la ecuación anterior?. La Figura 13.7 permite contestar esa pregunta.

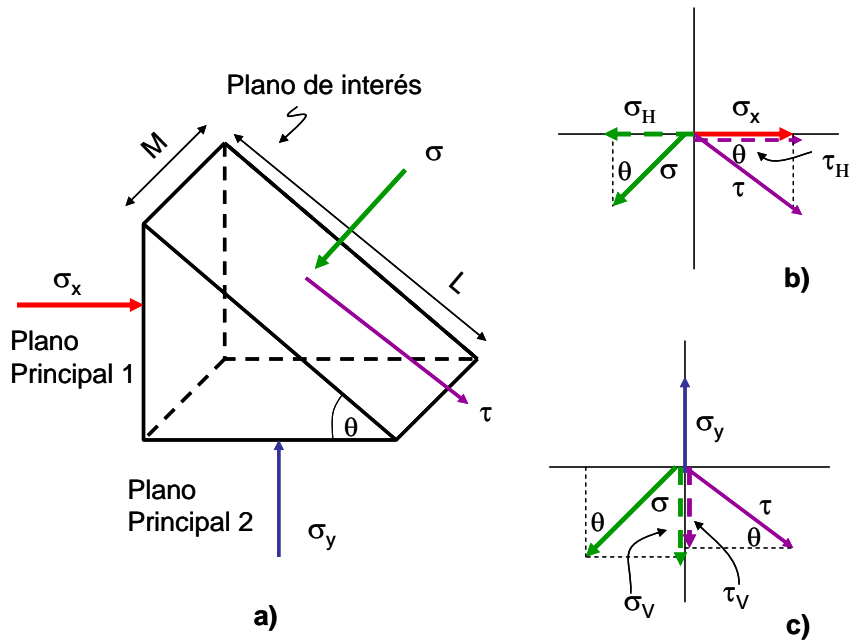


Figura 13.7. Plano de interés resuelto en función de otros dos planos principales.

Un plano de tensión puede ser resuelto en dos planos principales con un esfuerzo de corte igual a 0. Haciendo esto se obtienen las tensiones principales máxima y mínima, con un ángulo de 90 grados entre los planos principales.

El plano de interés tiene un área $A = M L$, por lo tanto el área del plano principal 1 está dada por $A_1 = M L \sin(\theta)$, y la del plano principal 2 por $A_2 = M L \cos(\theta)$. Recordando que las tensiones son fuerzas por unidad de área, el balance de fuerzas en la dirección horizontal conduce a (ver Figura 13.7b):

$$\begin{aligned}
 & A_1 \sigma_x + M L \tau_H = M L \sigma_H \\
 & \tau_H = \tau \cos(\theta) \\
 & \sigma_H = \sigma \sin(\theta) \\
 \text{Horizontalmente} \quad & M L \sin(\theta) \sigma_x + M L \tau_H = M L \sigma_H \\
 & M L \sin(\theta) \sigma_x + M L \tau \cos(\theta) = M L \sigma \sin(\theta)
 \end{aligned} \tag{13.5}$$

$$\boxed{\sigma_x + \frac{\tau}{\tan \theta} = \sigma}$$

Por su parte el balance de fuerzas en la dirección vertical es (ver Figura 13.7c):

$$\begin{aligned}
 & A_2 \sigma_y = M L \tau_V + M L \sigma_V \\
 & \tau_V = \tau \sin(\theta) \\
 & \sigma_V = \sigma \cos(\theta) \\
 \text{Verticalmente} \quad & M L \cos(\theta) \sigma_y = M L \tau_V + M L \sigma_V \\
 & M L \cos(\theta) \sigma_y = M L \tau \sin(\theta) + M L \sigma \cos(\theta)
 \end{aligned} \tag{13.6}$$

$$\boxed{\sigma_y = \tau \tan \theta + \sigma}$$

Combinando los recuadros en azul de las ecuaciones (13.5) y (13.6) con el objeto de eliminar el valor de la $\tan(\theta)$, resulta:

$$\begin{aligned}
 & \sigma_y = \tau \tan \theta + \sigma \\
 & \tan \theta = \frac{(\sigma_y - \sigma)}{\tau} \\
 & \sigma_x + \frac{\tau^2}{\sigma_y - \sigma} = \sigma
 \end{aligned} \tag{13.7}$$

$$\boxed{\tau^2 = (\sigma - \sigma_x)(\sigma_y - \sigma) = \sigma \sigma_y - \sigma^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma \sigma_x}$$

Rearreglando la ecuación (13.7), resulta:

$$\begin{aligned} \tau^2 &= \sigma\sigma_y - \sigma^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma\sigma_x = \\ &= -\sigma\left[\sigma - (\sigma_y + \sigma_x)\right] - \sigma_x\sigma_y = \end{aligned} \quad (13.8)$$

$$\tau^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right]^2 - \left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)\right]^2$$

La ecuación (13.8) recuadrada coincide con la ecuación del círculo de Mohr descrito por la ecuación (13.4). Por lo tanto los puntos de intersección del círculo de Mohr con el eje de tensión normal (σ_y y σ_x) representan las tensiones en los planos principales que permiten resolver las tensiones normal y de corte en cualquier plano del polvo compacto.

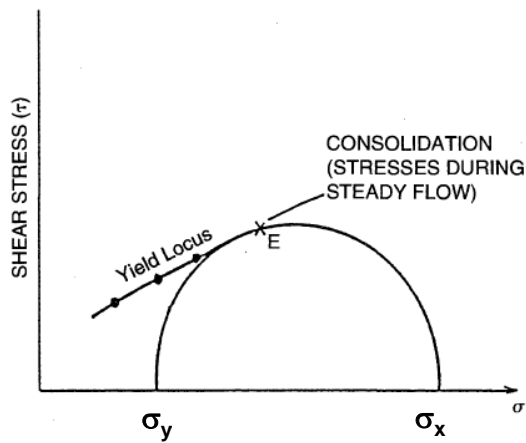


Figura 13.8. Círculo de Mohr tangente

En la Figura 13.8 se muestra un círculo de Mohr que es tangente al punto E de la curva tensión de corte vs. tensión normal. En cualquier situación de tensión representada por un semicírculo de Mohr tangente al gráfico de τ vs. σ , los sólidos estarán en el punto de fluencia (el material pasa de la deformación elástica a la plástica).

13.2.3. Ángulo de fricción interna (δ)

El ángulo de fricción interna es una medida de la resistencia que ofrecen los sólidos para fluir cuando se encuentran en condiciones de flujo estable. Ángulos efectivos de fricción interna elevados, indican que el sólido posee poca fluidez. La Figura 13.9 muestra como este ángulo puede ser determinado a partir de datos experimentales en celdas de corte. El ángulo δ se obtiene de la recta que pasa por el origen del gráfico τ vs. σ y que es tangente al círculo de Mohr, el cual a su vez es tangente al punto de fluencia E.

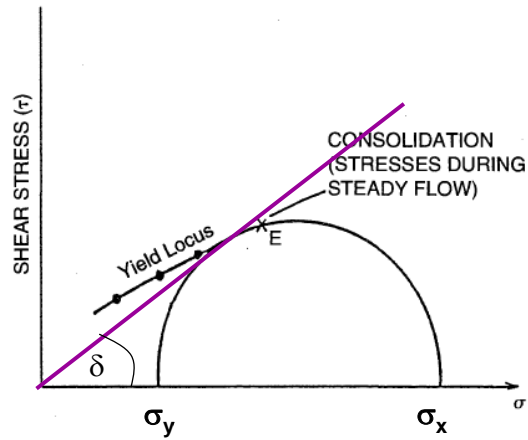


Figura 13.9. Angulo efectivo de fricción

13.2.4. Tensión del material en condiciones no confinadas (f_c) y tensión principal máxima (σ_x)

El círculo de Mohr provee dos variables claves al momento de caracterizar sistemas particulados y de diseñar silos: tensión del material en condiciones no confinadas (f_c) y tensión principal máxima (σ_x)

La tensión del material en condiciones no confinadas es la máxima tensión en un plano, cuando la tensión de corte es cero y además la tensión en el otro plano principal es también cero. Se puede calcular haciendo pasar un círculo de Mohr por el origen, y además tiene que ser tangencial a la curva τ vs. σ , (Figura 13.10).

La tensión principal máxima se determina también mediante el círculo de Mohr, esta variable representa la tensión máxima de consolidación del sistema particulado.

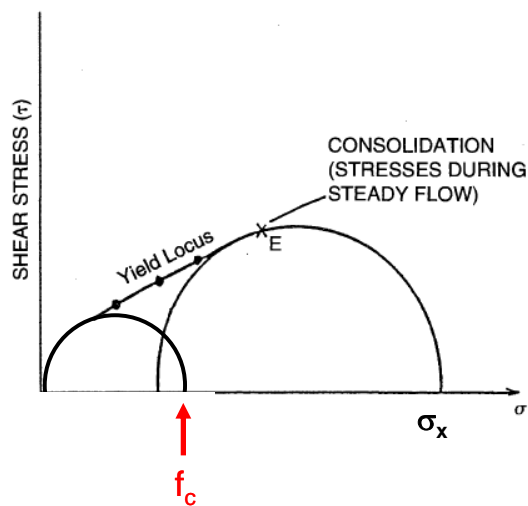


Figura 13.10. Tensión del material en condiciones no confinadas.

13.2.5. Función de flujo de polvo (PFF)

La función de flujo indica como un polvo compacto se comporta, y está definida por la siguiente función:

$$FF = \frac{\sigma_x}{f_c} \quad (13.9)$$

Esta funcionalidad se obtiene haciendo experimentos en celdas de corte usando distintos grados de compactación, y trazando los círculos de Mohr tangentes al punto de fluencia y los que pasan por el origen, tal como se describe en la Figura 13.11.

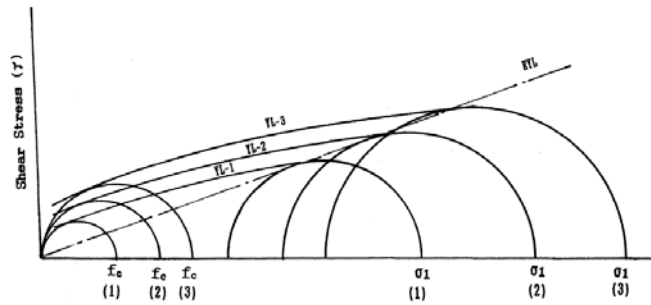


Figura 13.11. Datos experimentales para construir la curva FF.

En la Figura 13.12 se muestra una función de flujo de polvo típica.

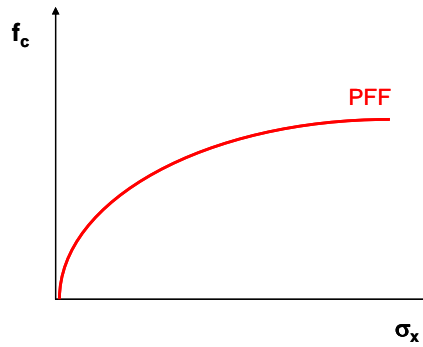


Figura 13.12. Función de flujo de polvo

Las propiedades vistas serán de utilidad para el diseño de silos.

Ejemplo:

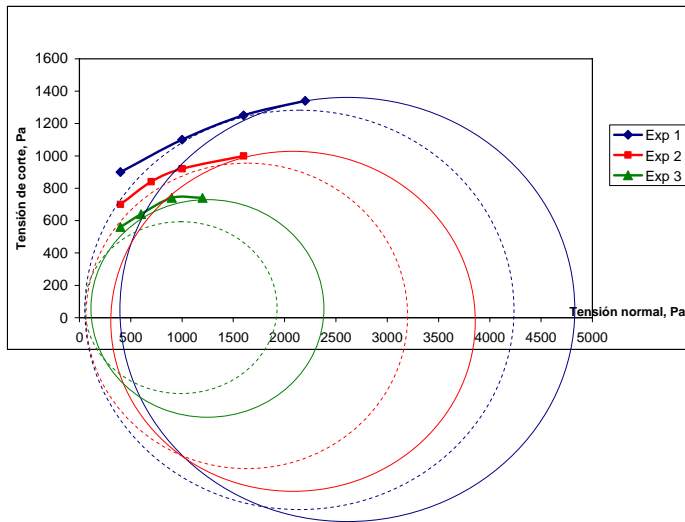
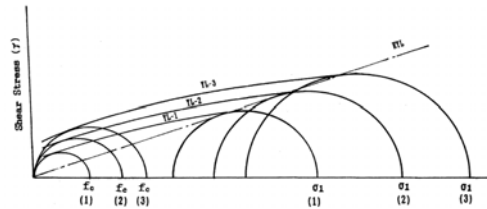
Se han realizado diversos experimentos en la celda de corte de Jenike, los resultados se resumen a continuación:

	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa
Máxima carga	2200	1340	1600	1000	1200	740
Cargas subsecuentes	1600	1250	1000	920	900	740
	1000	1100	700	840	600	640
	400	900	400	700	400	560

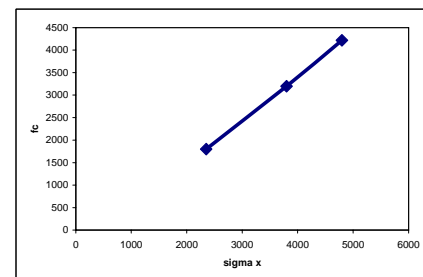
Determinar la función de flujo de polvo (PFF).

Solución:

	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa	Tensión Normal, Pa	Tensión de corte, Pa
Máxima carga	2200	1340	1600	1000	1200	740
Cargas subsecuentes	1600	1250	1000	920	900	740
	1000	1100	700 <td 840	600	640	
	400	900	400	700	400	560



Exp	fc	σx
1	1800	2350
2	3200	3800
3	4220	4800



13.2.6. Otras propiedades

- Angulo de reposo: El ángulo de reposo es el ángulo con la horizontal que tiene una pila de material que permanece en estado estable. Algunos autores sugieren que ángulos hasta 35° indican que el material puede fluir libremente, entre $35-45^\circ$ indican que el material es algo cohesivo, mientras que ángulos entre 45 y 55° señalan una gran cohesividad del material, finalmente ángulos mayores a 55° indican movilidad nula. A pesar de que el ángulo de reposo es indicativo de la capacidad de fluir del material, no debe usarse directamente en el diseño de silos. Por ejemplo, un material que libremente posee un ángulo de reposo bajo (puede fluir bien) al momento de ser compactado por otras partículas que se almacenan sobre él, puede desarrollar fuerzas cohesivas que limiten la salida del material del silo.

Como regla general, se puede decir que partículas más grandes tienen menores ángulos de reposo ya que tienden a adherirse menos que las partículas pequeñas. Las partículas esféricas poseen menor que ángulo de reposo que las no-esféricas. La humedad aumenta la cohesividad del material, por lo tanto el ángulo de reposo también aumenta.

Si se aplican tensiones bajas a un sistema particulado, el ángulo de reposo puede ser de utilidad para el diseño de silos.

- Angulo de deslizamiento: Es el ángulo que necesita dar a un plano para que el material se deslice por el mismo, debido a su propio peso. Este ángulo está obviamente influenciado por la rugosidad del plano.
- Angulo de transporte: Es el ángulo al cual una cinta transportadora lisa puede operar sin perder material. Como regla del pulgar no debe exceder el 50% del valor del ángulo de reposo.

13.3. Principios fundamentales involucrados en el diseño de silos

La mala operación de silos es muy común en plantas donde se manejan sólidos, algunos problemas frecuentes se definen a continuación.

13.3.1. Canalización

La canalización ocurre cuando sólo el material por encima del orificio de descarga es el que abandona el silo (Figura 13.13). Este comportamiento es característico de polvos cohesivos, y ocasiona una disminución de la capacidad del silo. En efecto el material que no se descarga, se queda estático dentro del silo y puede sufrir procesos de aglomeración, degradación, etc.

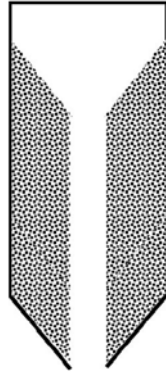


Figura 13.13. Canalización

13.3.2. Formación de arcos en la descarga

Un arco es una obstrucción estable que se forma en el punto de descarga del silo. El arco soporta el contenido del silo evitando la descarga. En el caso de polvos finos, la formación de arcos está relacionada con la tensión del material no confinado, donde las fuerzas cohesivas contribuyen a la formación del arco. Cuando las partículas son más grandes, la obstrucción se da por el bloqueo que ocasionan las partículas que se organizan como si fuera un puente. Existe una fricción entre las paredes del silo y las partículas que ocasiona la formación del arco, el cual sólo puede romperse mecánicamente. La Figura 13.14 describe la formación del arco. La principal tensión en el arco está dada por la tensión normal a las paredes del recipiente (σ_x). Como no existe una tensión que actúe debajo del arco, el componente de tensión de menor magnitud es cero (σ_y). El arco podría colapsar si la componente principal σ_x fuese mayor que la fuerza cohesiva entre las partículas.

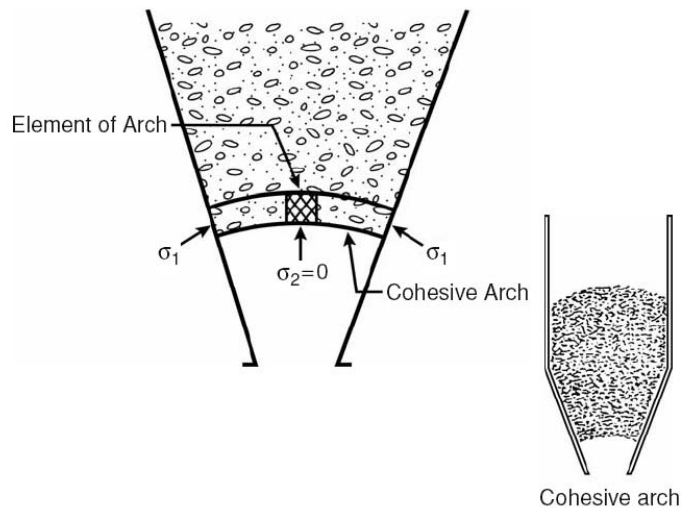


Figura 13.14. Formación de un arco cohesivo.

13.3.3. Segregación

La segregación del material en silos ocurre cuando la distribución de tamaño de partículas es grande. La Figura 13.15 indica la segregación que puede darse dentro de los silos, fenómeno que es más común cuando se almacenan materiales que fluyen libremente.

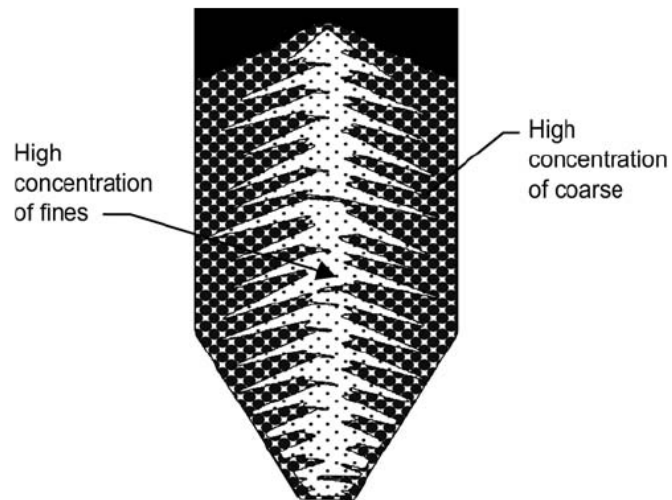


Figura 13.15. Segregación durante el llenado del silo.

13.4. Tipos de flujos en silos

La descarga del material, como lo describe la Figura 13.16, puede responder a flujo másico o a flujo tipo embudo.

En el flujo másico lo primero que entra, primero sale. En cambio en el flujo tipo embudo lo último que entra es lo primero que sale.

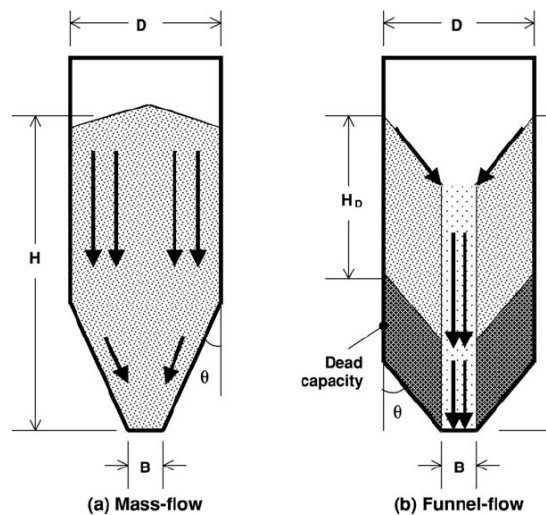


Figura 13.16. Tipos de flujos en silos.

13.5. Perfiles de presión en silos

Las tensiones del sistema particulado dentro de la parte cilíndrica del silo pueden analizarse mediante el modelo diferencial de Janssen. Para obtener el perfil de presiones en el silo se plantea un balance de fuerzas, donde los componentes son (ver Figura 13.17):

$$\text{Fuerza vertical (ejercida por los sólidos) hacia abajo} \quad \frac{\pi D^2}{4} P_V \quad (13.10)$$

$$\text{Fuerza vertical (ejercida por los sólidos) hacia arriba} \quad \frac{\pi D^2}{4} (P_V + \Delta P_V) \quad (13.11)$$

$$\text{Fuerza (ejercida por los sólidos) horizontal} \quad \mu_W (R_H \pi D \Delta z) \quad (13.12)$$

$$\text{Fuerza vertical debido al peso de los sólidos hacia abajo} \quad \frac{\pi D^2}{4} \rho_B g \Delta z \quad (13.13)$$

donde D es el diámetro del recipiente, P_V la presión en sentido vertical, P_H la presión en sentido horizontal, ρ_B la densidad del lecho y μ_w es el coeficiente de fricción con la pared. La ecuación (13.11) representa la fuerza de reacción del sólido que se encuentra por debajo de la rodaja de espesor diferencial.

El balance de fuerzas conduce a:

$$\frac{\pi D^2}{4} P_V - \frac{\pi D^2}{4} (P_V + \Delta P_V) + \frac{\pi D^2}{4} \rho_B g \Delta z - \mu_W (R_H \pi D \Delta z) = 0 \quad (13.14)$$

$$-\frac{\pi D^2}{4} \Delta P_V + \frac{\pi D^2}{4} \rho_B g \Delta z - \mu_W (R_H \pi D \Delta z) = 0 \quad (13.15)$$

Dividiendo por Δz y aplicando el límite para este diferencial tendiendo a cero, resulta:

$$\begin{aligned} \frac{\pi D^2}{4} \frac{dR_V}{dz} + \frac{\pi D^2}{4} \rho_B g - \mu_W R_H \pi D = 0 \\ \frac{dR_V}{dz} + \frac{4\mu_W R_H}{D} + \rho_B g = 0 \end{aligned} \quad (13.16)$$

Para resolver la ecuación (13.16) hay que relacionar las tensiones horizontales con las tensiones o presiones verticales. En el caso que el silo estuviera lleno de líquido, según el principio de Pascal, ambas presiones serían idénticas; ya que la presión aplicada en un punto de un líquido en un recipiente se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del volumen. Sin embargo cuando se trata de

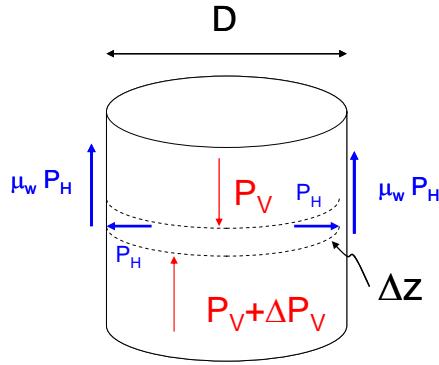


Figura 13.17. Balance de fuerzas en un silo.

sólidos la situación es diferente. Considere por ejemplo una pila de monedas, una sobre otra en contacto con el aire. En este caso particular la presión horizontal es cero, no existe una fuerza que acelere las partículas de los costados y consecuentemente no es necesaria una fuerza de reacción que prevenga el movimiento. Los sistemas particulados tienen propiedades intermedias entre los fluidos y los cuerpos sólidos continuos (como por ejemplo las monedas), para estos sistemas la presión en sentido horizontal puede expresarse como:

$$P_H = k_j P_V \quad (13.17)$$

donde k_j es el factor de Janssen, siendo cero para sólidos continuos y 1 para líquidos. Reemplazando la ecuación (13.17) en la ecuación (13.16) resulta:

$$\frac{dP_V}{dz} + \frac{4\mu_w k_j}{D} P_V + \rho_B g = 0 \quad (13.18)$$

Integrando la ecuación (13.18) se obtiene:

$$P_V = \frac{\rho_B g D}{4\mu_w k_j} \left[1 - \exp\left(\frac{-4\mu_w k_j z}{D}\right) \right] + P_{V0} \exp\left(\frac{-4\mu_w k_j z}{D}\right) \quad (13.19)$$

donde P_{V0} es la presión en $z=0$, que es la tensión de carga a silo. En el caso que no exista una fuerza actuando sobre la parte superior del silo, resulta:

$$P_V = \frac{\rho_B g D}{4\mu_w k_j} \left[1 - \exp\left(\frac{-4\mu_w k_j z}{D}\right) \right] \quad (13.20)$$

Cuando z es muy próximo a cero:

$$\exp\left(\frac{-4\mu_w k_j z}{D}\right) \cong 1 - \frac{4\mu_w k_j z}{D} \quad (13.21)$$

Reemplazando la ecuación (13.21) en (13.20):

$$z \rightarrow 0 \quad P_V = \rho_B g z \quad (13.22)$$

La ecuación (13.22) indica que la presión cercana a la entrada de un silo es muy similar a la que exhibe un líquido. Por su parte si la longitud del silo fuese muy grande, P_V tiende a:

$$z \rightarrow \infty \quad P_V = \frac{\rho_B g D}{4\mu_w k_j} \quad (13.23)$$

En la Figura 13.18 se muestran los perfiles de presión para líquidos y sistemas particulados.

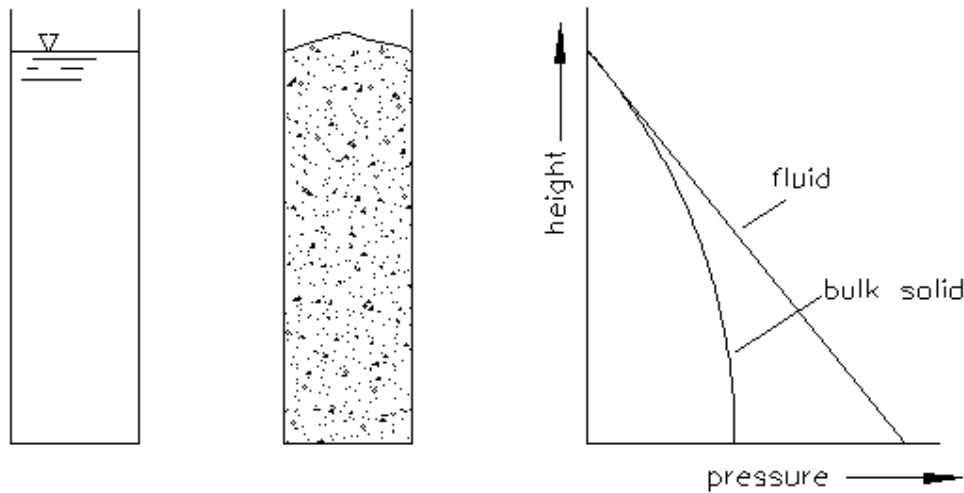


Figura 13.18. Perfiles de presión

El coeficiente de fricción μ_w puede estimarse de ensayos en celdas similares a la presentada en la Figura 13.5, a partir de los datos de la tensión de corte y la tensión normal pueden estimarse gráficos similares al descrito por la Figura 13.3. Conociendo el valor del ángulo de fricción con la pared (ϕ_w o ϕ), el coeficiente de fricción o el componente de tensión de corte se puede calcular como:

$$\tan(\phi_w) = \frac{\tau}{\sigma} = \mu_w \quad (13.24)$$

Para poder calcular los perfiles de presión, sólo nos resta saber como estimar la constante de Janssen. Existen varias correlaciones para estimar la constante de Janssen, entre las disponibles, una de ellas es:

$$k_j = \frac{1 + \text{sen}(\delta)}{1 - \text{sen}(\delta)} \quad (13.25)$$

donde δ es el ángulo efectivo de fricción interna.

13.6. Descarga de silos

El caudal de sólidos que abandona un silo con descarga cónica puede estimarse a partir de la ecuación que se presenta a continuación, teniendo en cuenta las propiedades descriptas en la Figura 13.19.

$$M_p = \frac{\pi}{4} \rho_B \sqrt{g B^{0.5} 2 \tan(\theta_H)} \quad (13.25)$$

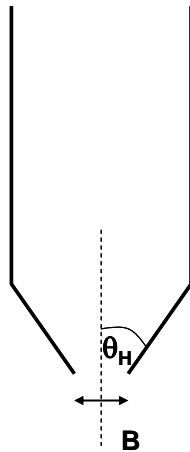


Figura 13.19. Silo con descarga cónica.

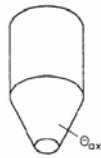
13.7. Apertura de descarga y ángulo

El diseño apropiado de un silo que permita una descarga del tipo flujo de masa se basa en dos factores: ángulo y apertura de descarga. Hay que dar una inclinación suficiente a la descarga y la apertura debe ser lo suficientemente ancha para que el silo opere bien. Para que esto ocurra se debe romper el arco que tienden a formar los sistemas particulares en la parte inferior del silo.

Haciendo un balance de fuerzas sobre el arco (el cual no se presenta en el apunte, ver texto de Holdich 2002), es posible determinar el tamaño mínimo del orificio:

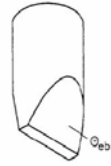
$$B = \frac{H(\theta) f_{crit}}{\rho_B g} \quad (13.26)$$

donde f_{crit} es la tensión del material no confinado crítica (que veremos en la próxima sección como se calcula, $H(\theta)$ es un factor determinado por la pendiente de la pared de la zona de descarga, y puede estimarse como sigue:



Descarga cónica

$$H(\theta) = 2 + \frac{\theta}{60^\circ} \quad (13.27)$$



Descarga tipo ranura

$$H(\theta) = 1 + \frac{\theta}{180^\circ} \quad (13.28)$$

13.8. Factor de flujo y diseño de la descarga

El factor de flujo de la descarga (Hopper Flow Factor, HFF) se determina a partir de las cartas de Jenike (obtenidas experimentalmente) que se presentan en las Figuras 13.20 a 13.23, para distintos valores del ángulo efectivo de fricción interna.

Para un dado material el ángulo efectivo de fricción interna (δ) se determina mediante ensayos en la celda de Jenike tal como se describió en la sección 13.2.3. El ángulo de la descarga (θ) puede conocerse (de un silo existente) o estimarse (caso diseño). El ángulo de fricción con la pared (ϕ_w) se estima según la sección 13.2.1.

Las cartas de Jenike dividen la operación en dos zonas (flujo másico o tipo embudo, ver Figura 13.20).

Entonces a partir de experimentación y de la geometría del equipo es posible conocer δ , ϕ_w y θ . Con esta información queda definido el valor del factor de flujo FF mediante el uso de las Figuras 13.20 a 13.23.

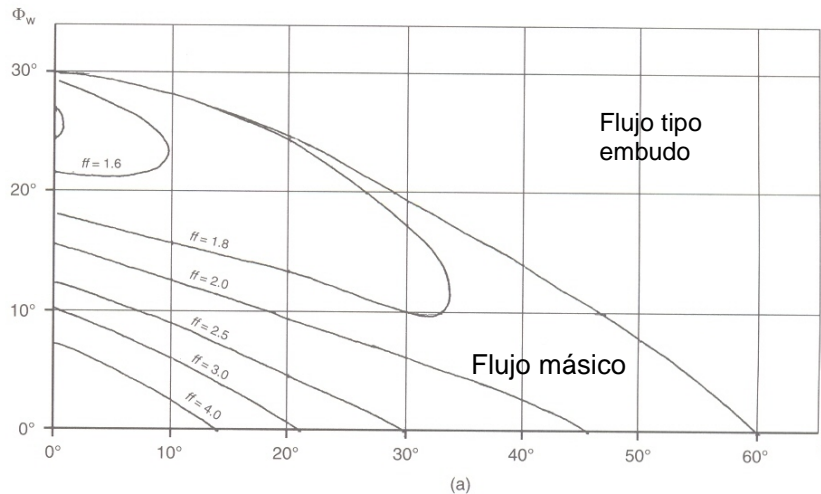


Figura 13.20. Factor de flujo (FF) como función del ángulo de fricción con la pared, el ángulo de la descarga cónica y para un ángulo efectivo de fricción interna de 30° .

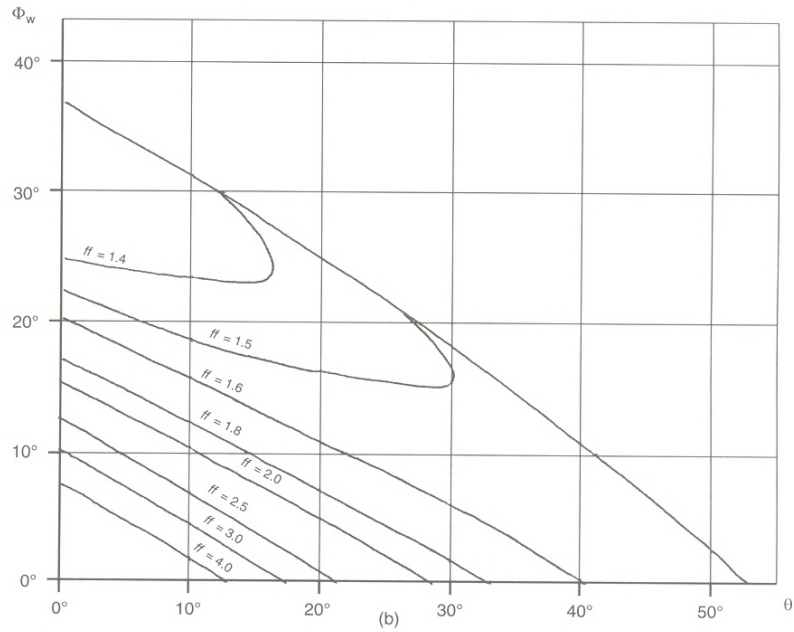


Figura 13.21. Factor de flujo (FF) como función del ángulo de fricción con la pared, el ángulo de la descarga cónica y para un ángulo efectivo de fricción interna de 40° .

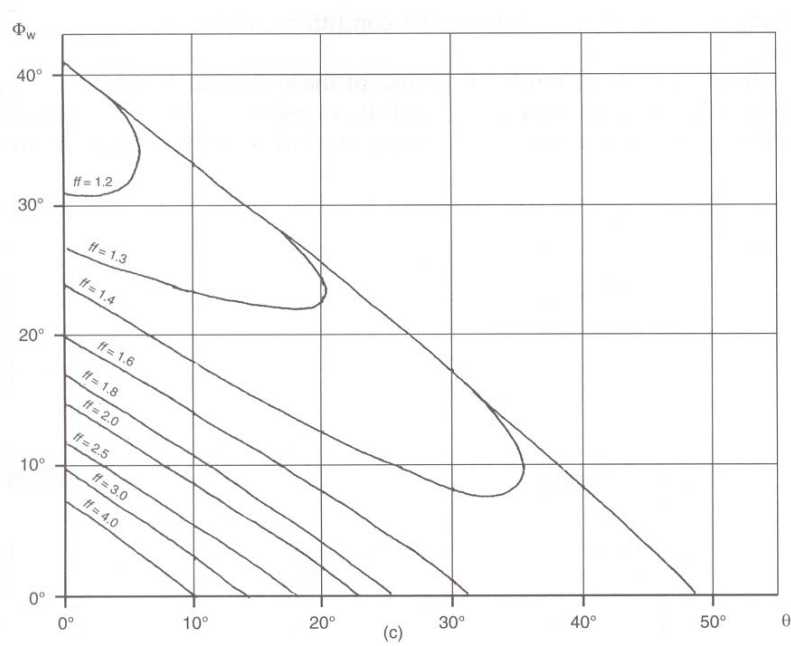


Figura 13.22. Factor de flujo (FF) como función del ángulo de fricción con la pared, el ángulo de la descarga cónica y para un ángulo efectivo de fricción interna de 50° .

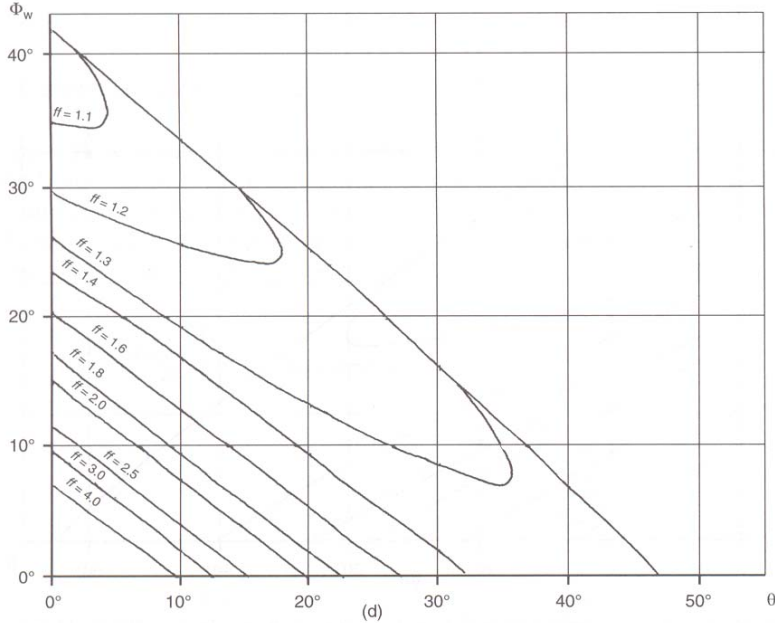


Figura 13.23. Factor de flujo (FF) como función del ángulo de fricción con la pared, el ángulo de la descarga cónica y para un ángulo efectivo de fricción interna de 60° .

Una vez calculado el valor de FF es posible construir un gráfico como el que se muestra en la Figura 13.24. La curva del factor de flujo de descarga HFF se construye teniendo en cuenta la ecuación (13.9) y el valor de FF obtenido de las cartas de Jenike. El punto de intersección de las curvas HFF y PFF da la tensión del material no confinado que divide las zonas de operación con arcos estables y no estables. Se puede calcular la tensión crítica, la cual debe utilizarse para calcular el tamaño de la descarga B, que evita la formación de arcos estables.

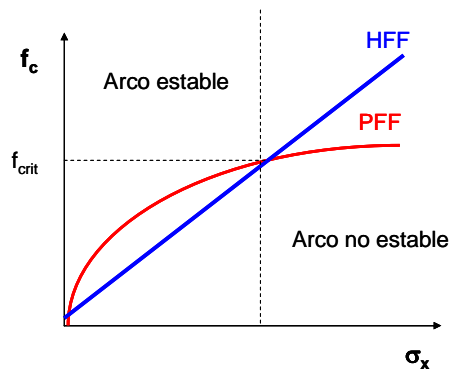


Figura 13.24. Factor de flujo de la descarga (HFF) y Función de flujo de polvo (PFF).

13.9. Resumen de pautas para el diseño

- Hacer ensayos en las celdas de corte sólo con partículas.
- Estimar las tensiones de material no confinado (f_c) y las máximas tensiones (σ_x). Estimar el ángulo de fricción efectiva (δ).
- Con pares de f_c y σ_x estimar la curva PFF.
- Hacer ensayos en la celda de corte para estimar el ángulo de fricción con la pared (ϕ_w).
- A partir de los datos δ y ϕ_w calcular el ángulo θ que divide las zonas de flujo másico y de embudo. Disminuir el valor hallado en 3° , estimar el valor de FF (ver procedimiento en la Figura 13.25).
- Dibujar las funciones PFF y HFF, estimar f_{crit} .
- Calcular B.

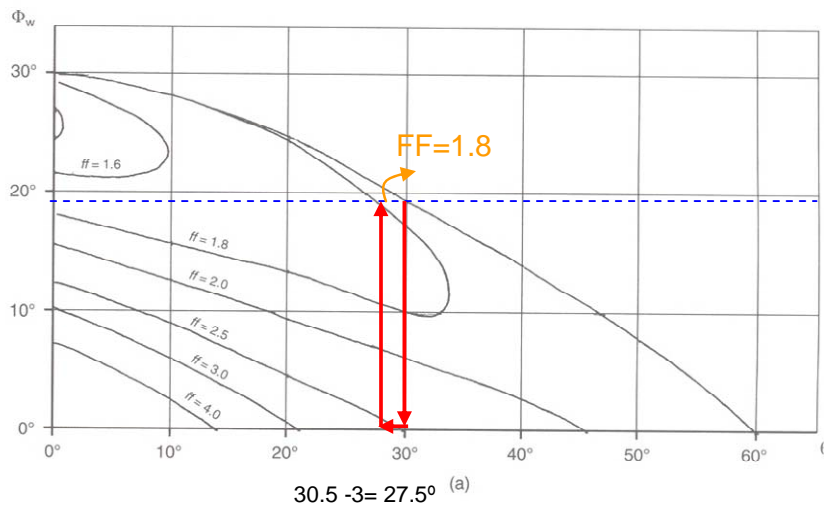


Figura 13.23. $\delta=30^\circ$, $\phi_w=19^\circ$

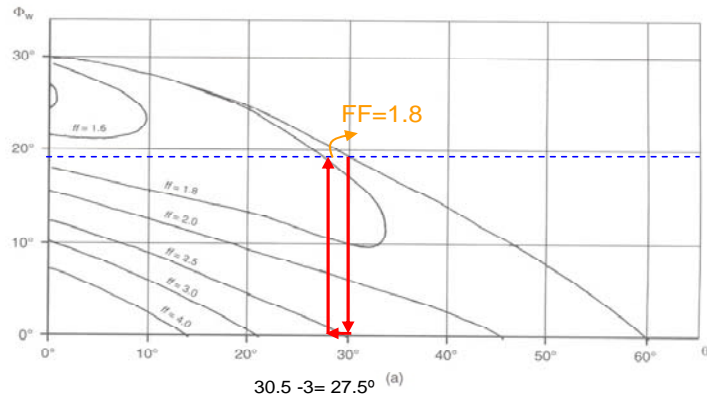
Ejemplo

Los resultados de ensayos en celdas de corte condujeron a un ángulo de fricción con la pared de 19° , un ángulo de fricción interna de 30° , además se obtuvieron los siguientes datos de tensión del material no confinado vs la tensión máxima (unidades kN/m^2):

f_c	σ_x
2.4	0.97
2.0	0.91
1.6	0.85
1.3	0.78

Para un polvo de una densidad de 1300 Kg/m^3 y descarga tipo cónica estime el ángulo de la sección cónica para que el flujo sea másico y el diámetro de la descarga.

Solución



El ángulo θ debe ser de 27.5°

y $FF=1.8$

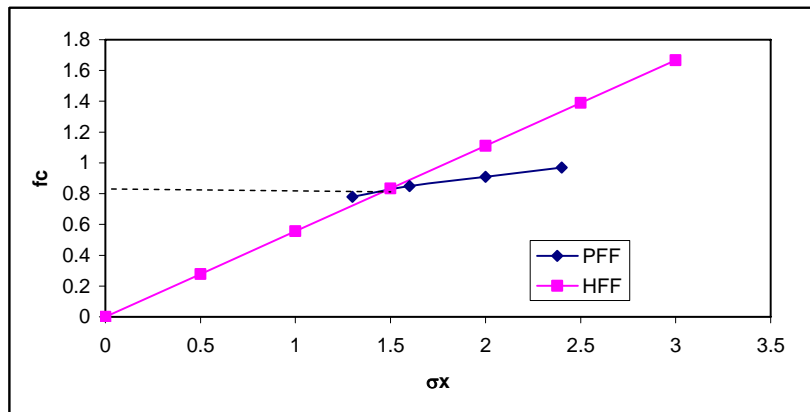
$$f_c = \frac{1}{FF} \sigma_x$$

f_c	σ_x
2.4	0.97
2	0.91
1.6	0.85
1.3	0.78

PFF

σ_x	f_c
0	0.00
0.5	0.28
1	0.56
1.5	0.83
2	1.11
2.5	1.39
3	1.67

HFF



$F_{crit} = 0.83 \text{ kN/m}^2$

$$H(\theta) = 2 + \frac{\theta}{60^\circ}$$

H = 2.46

$$B = \frac{H(\theta) f_{crit}}{\rho_B g}$$

B = 0.16 m

13.10. Bibliografía:

- Holdich, R.G., Fundamentals of Particle Technology, Midland Information Technology and Publishing, United Kingdom, 2002.
- Thomson, F. M., "Storage and Flow of Particulate Solids", Capítulo 8 en Handbook of Powder Science & Technology, editado por Fayed, M. E., Otten, L., Chapman & Hall, N.Y., 1997.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H., Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2005.
- Rhodes, M., Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons, England, 1998.
- Seville, J.P.K., Tüzün, U., Clift, R., Processing of Particulate Solids, Blackie Academic & Professional, London, UK, 1997.