

# DISEÑO DE SILOS Y TOLVAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE MATERIALES PULVERULENTOS. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN DE DESCARGA.

J.L. Amorós, G. Mallol, E. Sánchez, J. García

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC)  
Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)  
Universitat Jaume I. Castellón. España.

## RESUMEN

*En los procesos de fabricación de baldosas, fritas y colores cerámicos se manejan grandes cantidades de sólidos pulverulentos de diferente naturaleza, que deben almacenarse y descargarse convenientemente. Durante la descarga de estos materiales pueden producirse interrupciones del flujo por formación de bóvedas en los silos, segregaciones del material según su tamaño, etc. Algunos de estos problemas pueden minimizarse e incluso anularse con un adecuado diseño de los silos. En este trabajo se ha aplicado la teoría de Jenike para el diseño de silos a tres tipos de materiales pulverulentos: polvo atomizado, empleado en la fabricación de gres porcelánico, óxido de cinc y cuarzo, utilizados en la producción de fritas cerámicas. Para estos materiales se han calculado el ángulo máximo que debe formar la pared con la vertical en la zona de descarga del silo y el diámetro mínimo para que el flujo del material durante la descarga sea el adecuado y sin interrupciones. Asimismo se ha analizado la influencia de la superficie del silo sobre el tipo de flujo. Por último han realizado experimentos para verificar la utilidad de la metodología ensayada para el diseño de silos.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de productos cerámicos la mayor parte de las materias primas que se emplean se encuentran en forma de sólidos pulverulentos. El consumo diario de material pulverulento en el sector español de baldosas cerámicas se estima en unas 40000 toneladas, de ahí la importancia de conocer su comportamiento reológico, durante la carga y descarga de estos materiales en los lugares de almacenamiento (silos y tolvas fundamentalmente).

El comportamiento reológico de los materiales pulverulentos es tan complejo que no puede ser tratado como el de los líquidos o las suspensiones ni como el de los sólidos. Este hecho provoca el que se produzcan, con demasiada frecuencia, problemas en su manejo: segregaciones, interrupciones en la descarga de los materiales de los silos y las tolvas por formación de bóvedas, existencia de zonas muertas en los silos, descargas incontroladas de sólidos, etc., que pueden incidir negativamente en el proceso de producción. Estos problemas pueden minimizarse si la descarga de los materiales pulverulentos en los silos y tolvas de almacenamiento es adecuada. La descarga de un material pulverulento puede ser de dos tipos: tubular o másica. La existencia de un tipo de flujo u otro dependerá de la naturaleza del sólido pulverulento y del recipiente que lo contiene. En consecuencia para diseñar un silo con un tipo de flujo concreto habrá que considerar conjuntamente las características del material y las del propio silo.

### 1.1.- TIPOS DE FLUJO

#### 1.1.1.-Flujo tubular

El flujo tubular consiste en la formación de un canal de flujo, alineado con la boca de salida del silo, rodeado por una zona en la cual el material permanece inicialmente estático (figura 1). Durante la descarga del silo, si el material es poco cohesivo, la parte más alta pegada a las paredes se va desmoronando, alimentando el canal central. Si el material es muy cohesivo, el vaciado del silo puede llegar a detenerse al formarse un canal central vacío, rodeado por material estático.

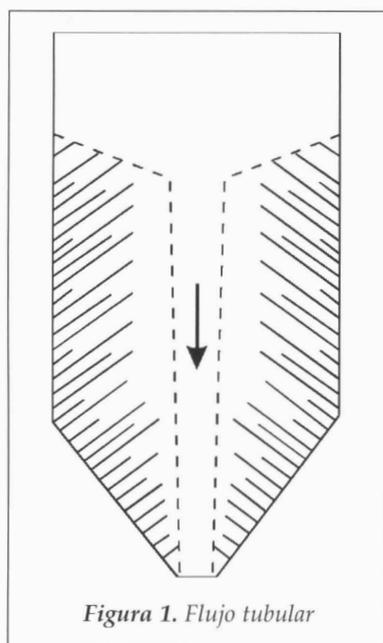


Figura 1. Flujo tubular

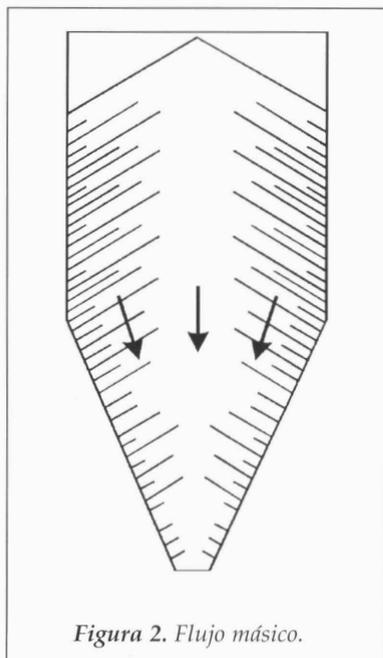


Figura 2. Flujo másico.

En la descarga de un silo que lo haga con flujo tubular el material no se mueve todo a la vez, lo que provoca que el caudal de material en la boca de salida y la densidad aparente del lecho de material resultante se vayan modificando durante el transcurso de esta operación. Incluso cuando el silo se ha vaciado casi completamente existe en su interior material que aún no se ha movido. Este sólido, acumulado en las zonas muertas del silo, no solo disminuye su capacidad efectiva sino que puede incluso convertirse en inservible si cambia sus propiedades con el paso del tiempo (por secado, oxidación, etc.). Además, este tipo de flujo acentúa los efectos negativos que derivan de la falta de homogeneidad del polvo almacenado, debido a la segregación por tamaños que puede producirse durante el llenado.

Una de las pocas ventajas de este tipo de flujo es el menor desgaste que sufren las paredes del silo, ya que su rozamiento durante la descarga con el polvo es despreciable. Además la presión que soportan las paredes en este tipo de silos es menor, necesitando por tanto una menor cantidad de material en su construcción.

### 1.1.2.- Flujo másico

Este tipo de flujo se caracteriza porque todo el material se mueve a la vez durante la descarga; en particular, el material pegado a las paredes se desliza sobre estas vaciándose junto con el resto. Desde el inicio de la descarga ninguna partícula o aglomerado permanece en su situación original, todas se mueven lo que impide la existencia de zonas muertas. El material que primero entra en el silo es el primero que sale (first in-first out), lo que tiende a mantener constante el tiempo de residencia o almacenamiento del polvo en el silo en un proceso continuo.

La descarga de un silo en flujo másico no se detiene por la formación de canales, puesto que todo el material se mueve a la vez. Además, las tensiones que aparecen durante la descarga de un silo son predecibles, por lo que puede diseñarse para que no se formen arcos que la interrumpan.

El caudal de descarga y la densidad del lecho de material durante el vaciado son menos variables que en el caso de flujo tubular. Otra ventaja, no menos importante, de este tipo de flujo es la reducción o eliminación de los problemas asociados a la segregación, que pueda aparecer durante la carga. En efecto que todo el material se mueva a la vez provoca un cierto mezclado que tiende a incrementar la homogeneidad del polvo a la salida. De hecho los silos de flujo másico, en ocasiones, se aconsejan como sistemas para el mezclado de sólidos.

Flujo másico	Flujo tubular
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elimina la posibilidad de obstrucciones del flujo</li> <li>-Minimiza los efectos asociados a la segregación por tamaños</li> <li>-Renovación del material (no existen zonas muertas)</li> <li>-El flujo es uniforme y fácil de controlar</li> <li>-La densidad del lecho de polvo que se descarga es prácticamente constante</li> <li>-Se aprovecha toda la capacidad de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La altura necesaria para la misma capacidad es menor</li> <li>-Las presiones que soportan las paredes son más bajas</li> <li>-La abrasión sobre las paredes es menor</li> </ul>

Tabla 1. Comparación entre el flujo másico y el flujo tubular. Ventajas.

## 1.2.- DISEÑO DE SILOS

Consiste en determinar el valor del ángulo máximo que forma las paredes del silo con la vertical en la zona de descarga,  $\theta$ , y el del tamaño mínimo de la boca de salida,  $D$ , para los que la descarga del silo se realiza por flujo másico sin interrupciones (figura 3).

### 1.2.1.- Consideraciones previas

#### 1.2.1.1.- Obstrucciones de la boca de salida

El tamaño de la boca de salida de un silo debe ser lo suficientemente grande para que no se obture durante su descarga. Este fenómeno puede ser debido a la formación de

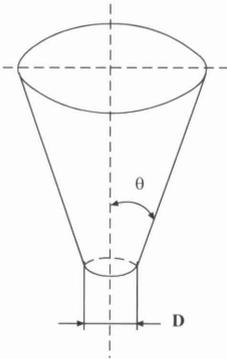


Figura 3. Variables de diseño

bóvedas, si el polvo es cohesivo, o al taponado por formación de estructuras, si las partículas son suficientemente grandes.

Para evitar las interrupciones del flujo por el segundo mecanismo, basta con que la boca de salida sea un orden de magnitud mayor que el de las partículas o aglomerados que constituyen el polvo. El cálculo del diámetro de salida, que evite las interrupciones por el primer mecanismo, es más laborioso y se basa en la teoría desarrollada por Jenike<sup>[1,2,3]</sup> a mediados de la década de los 60, algunos de cuyos aspectos se tratarán a continuación.

1.2.1.2.- Requisitos que debe cumplir el sistema para evitar las interrupciones del flujo

Analicemos lo que le sucede a un elemento de polvo en contacto con la pared del silo durante la descarga del mismo (figura 4). Cuando el elemento se encuentra en lo alto del silo está sin compactar ( $p=0$ ), ya que sobre él no actúa ninguna presión. Ahora bien, conforme va descendiendo, se va compactando debido a que la presión imperante en el silo ( $p$ ) va aumentando. Como se aprecia en la figura 4 inicialmente la presión se incrementa mucho con la profundidad, hasta aproximarse al final de la vertical del silo, donde permanece prácticamente constante. En la intersección entre la pared vertical y la inclinada, la presión por lo general se incrementa de manera abrupta. A partir de este punto esta se va reduciendo conforme el material se aproxima a la boca de salida.

La resistencia mecánica a la cizalla de un material ( $f$ ) experimenta una variación similar a la de la presión, ya que esta propiedad del lecho de polvo es función de la

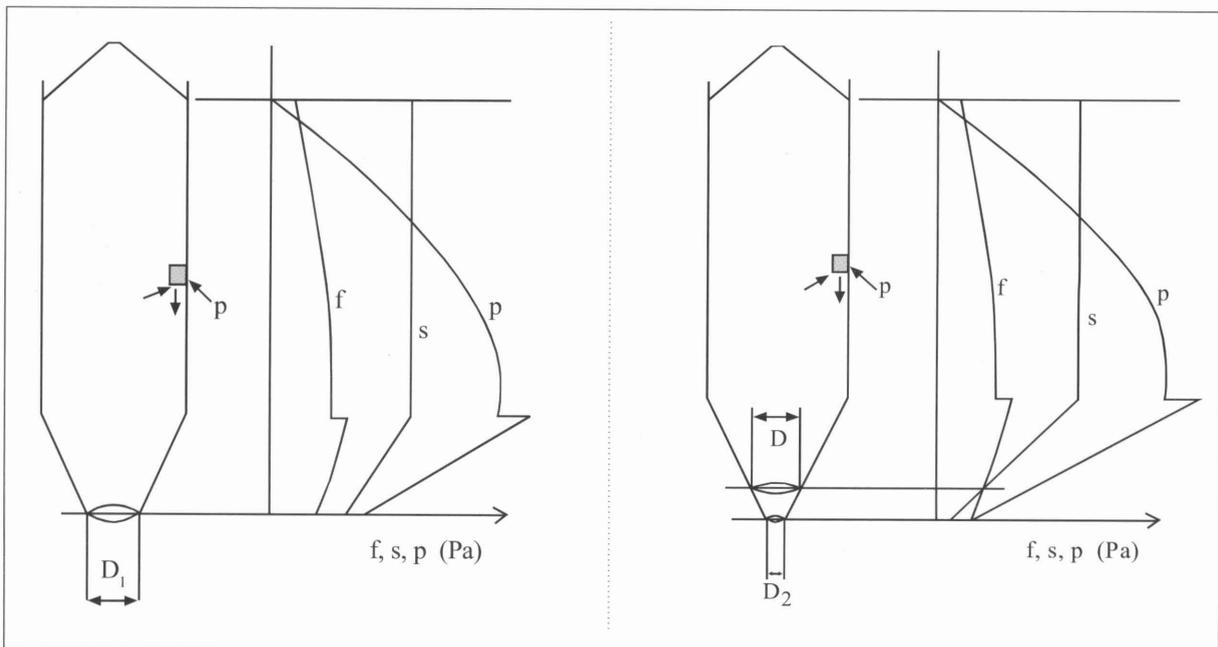


Figura 4. Distribución de la presión ( $p$ ), de la resistencia mecánica a la cizalla del polvo ( $f$ ) y de la tensión de cizalla ( $s$ ) en el interior de un silo.

[1] JENIKE, A. W. Gravity flow of solids. Bulletin of the University of Utah. No 123, 1961.  
 [2] JENIKE, A. W. Storage and flow of solids. Bulletin of the University of Utah. 53(26), 1964.  
 [3] JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. R. Review of the principles of flow of bulk solids. CIM Trans.,73, 141-146, 1970.

compacidad la cual a su vez depende de la presión a la que está sometido el material que, como acabamos de ver, cambia con la posición. Por lo tanto, durante la descarga, la resistencia mecánica a la cizalla del material se modificará según su posición en el silo. Por otra parte, el elemento de polvo que estamos tratando, está sometido en todo momento a una tensión máxima de cizalla ( $s$ ), cuya magnitud depende asimismo, de su posición en el silo, tal y como se representa en la figura 4.

En el ejemplo representado en la figura 4a, en todo momento la tensión máxima de cizalla a la que está sometido el elemento de polvo ( $s$ ) es mayor que su resistencia mecánica a la cizalla ( $f$ ), por lo que durante la descarga de este silo no podrán formarse bóvedas que impidan el flujo.

Por el contrario, si se reduce el tamaño de la boca del silo de  $D_1$  a  $D_2$  (figura 4b) manteniendo constante el resto de las variables (ángulo de pared, tipo de polvo, etc.) de manera que en algún punto del sistema se cumpla la condición de que el valor de la resistencia mecánica a la cizalla del material ( $f$ ) es superior al de la tensión máxima de cizalla a que está sometido ( $s$ ), en dicho punto se formará una bóveda. Así pues el valor del diámetro de salida,  $D$ , que corresponde al punto de corte de las líneas  $f$  y  $s$  de la figura 4b, es el diámetro mínimo para el cual no se forman bóvedas.

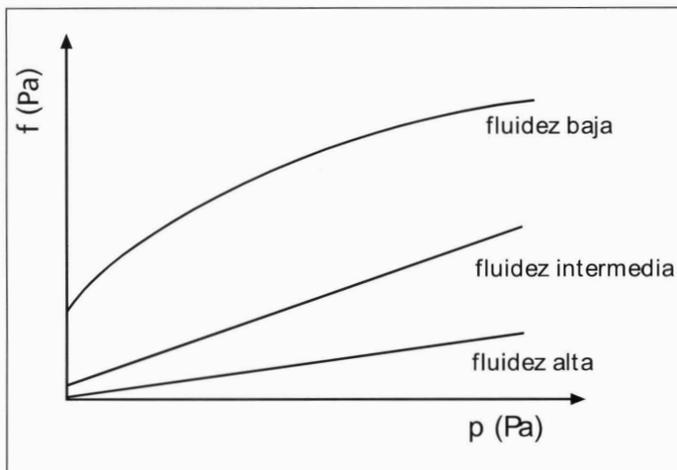


Figura 5. Funciones de flujo de diferentes materiales.

### 1.2.2.- La función de flujo de un material (FFM)

La función de flujo de un material pulverulento (FFM) es la variación de la resistencia mecánica a la cizalla ( $f$ ) del lecho de polvo compactado a una determinada presión ( $p$ ), en función de esta variable ( $p$ ).

En la figura 5, se han representado las funciones de flujo de una serie de materiales. Esta propiedad determina el comportamiento reológico de un material pulverulento a diferentes presiones de compactación, por lo que se considera una medida de su fluidez. En efecto, cuanto mayor es la ordenada en el origen y la pendiente de dicha representación, menor es la fluidez del polvo. La obtención de la función de flujo de un material pulverulento se realiza mediante experimentos de cizalla que se describirán en el apartado 3.3.1.

### 1.2.3.- El factor de flujo del sistema silo-material ( $ff$ )

El factor de flujo ( $ff$ ) de un sistema silo-material pulverulento es la representación de la tensión de cizalla máxima ( $s$ ) que actúa sobre un elemento del polvo almacenado en el silo frente a la presión a la que está sometido. Jenike observó que, dentro de cada sistema, el cociente entre ambos valores es constante.

El cálculo del factor de flujo ( $ff$ ) supone la resolución de las ecuaciones diferenciales representativas de las tensiones que aparecen en los silos durante la descarga. Dichas

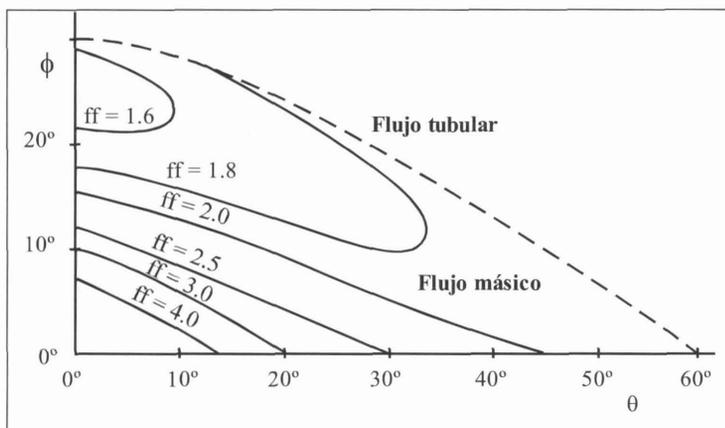


Figura 6. Gráfico de Jenike para un silo cilíndrico y para un ángulo de fricción interna  $\delta$  de  $30^\circ$ .

soluciones ha sido publicadas por Jenike, para silos de diferente geometría, en forma de gráficos denominados habitualmente gráficos de factores de flujo (figura 6).

El factor de flujo ( $ff$ ), a diferencia de la función de flujo del material (FFM), es una propiedad del conjunto silo-material, por lo que depende de algunas características de ambos. Para calcular el factor de flujo del sistema es necesario conocer:

el ángulo efectivo de fricción interna del polvo ( $\delta$ ), el ángulo de fricción entre el material y la superficie del silo ( $\phi$ ), el ángulo de pared en la zona de descarga del silo ( $\theta$ ) y la geometría del silo. El valor del ángulo efectivo de fricción interna del material ( $\delta$ ) y del ángulo de fricción entre el material y la superficie del silo ( $\phi$ ), se determinan mediante experimentos de cizalla que se describirán en los apartados 3.3.3 y 3.3.4.

### 1.2.4.- Cálculo de las variables de diseño

#### 1.2.4.1.- Cálculo del ángulo máximo de la pared del silo en la zona de descarga ( $\Theta$ )

Para calcular  $\theta$  se recurre a las gráficas de factor de flujo (figura 6). La zona triangular de estas representa las condiciones para las cuales el flujo del material durante la descarga del material es másico, de acuerdo con la teoría de Jenike.

La línea de trazos, que separa ambas zonas, determina las condiciones límite del sistema. En efecto esta línea representa los pares de valores ángulo máximo de la pared del silo ( $\theta$ ), ángulo de fricción del sistema polvo-pared ( $\phi$ ) para los que el flujo es másico. Como factor de seguridad se aconseja tomar un ángulo  $3^\circ$  inferior al estimado.

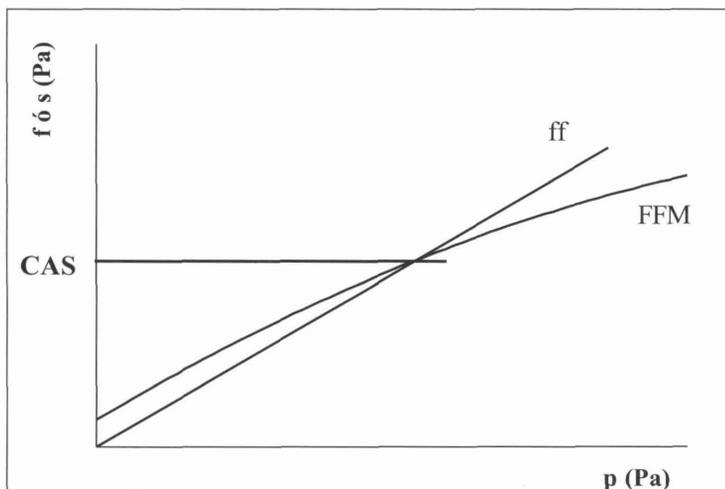


Figura 7. Criterio de flujo.

#### 1.2.4.2.- Cálculo del diámetro mínimo de la boca de salida ( $D$ )

De acuerdo con la figura 4, si se representan conjuntamente la función de flujo del material (FFM) y la inversa del factor de flujo del sistema ( $1/ff$ ), figura 7, en el punto de corte de ambas representaciones se cumple la condición de flujo  $s=f$ . Es decir, en este punto la tensión máxima de cizalla a la que está sometido el polvo ( $s$ ), es igual a

la resistencia mecánica del lecho ( $f$ ). A esta tensión se le denomina tensión crítica (CAS) y su valor se utiliza para calcular el tamaño mínimo del orificio de salida del silo. Para un silo cónico con abertura circular, el tamaño mínimo del orificio de salida ( $D$ ) se calcula a partir de la expresión:

$$D = \left(2 + \frac{\theta}{60}\right) \cdot \frac{CAS}{\rho \cdot g} \quad (1)$$

donde:

$D$	:	diámetro del orificio de salida (m)
$\theta$	:	ángulo entre la vertical y la pared del silo en la zona de descarga ( $^{\circ}$ )
CAS	:	tensión crítica (Pa)
$\rho$	:	densidad del lecho de polvo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## 2. OBJETIVO

El objetivo último de este trabajo es aplicar la metodología antes expuesta, basada en la teoría de Jenike, al diseño de silos que han de contener materiales pulverulentos empleados en la industria cerámica, con vistas a:

- Reducir los problemas que genera la segregación por tamaños de polvos atomizados
- Facilitar la descarga de materiales de elevada cohesividad utilizados en el proceso de fabricación de fritas
- Analizar la influencia que ejerce la superficie del silo sobre el comportamiento del material durante su descarga.

## 3. MATERIALES, EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1.- MATERIALES EMPLEADOS

Para observar visualmente la segregación por tamaños, se han utilizado mezclas de dos esmaltes granulados de diferentes tamaños y colores. Uno más grueso, de color negro y de tamaño superior a  $500 \mu\text{m}$ . El otro más fino, de color blanco y de tamaño inferior a  $500 \mu\text{m}$ . Los tamaños medios de ambos granulados fueron  $800 \mu\text{m}$  y  $350 \mu\text{m}$  respectivamente.

Para estudiar el comportamiento de materiales de elevada fluidez se han empleado tres tipos de polvo atomizado utilizados como base en la fabricación de baldosas: gres porcelánico, soporte de cocción blanca y cocción roja. Sus distribuciones por tamaños de los gránulos se presentan en la figura 8.

Para estudiar la descarga de materiales de media y elevada cohesividad, se empleó un cuarzo y un óxido de cinc de los habitualmente utilizados como materia prima en el proceso de fabricación de fritas. El tamaño medio, determinado por difracción láser, del cuarzo resultó ser de  $40 \mu\text{m}$  (cuarzo SE-6) y el del óxido de cinc de  $2 \mu\text{m}$ .

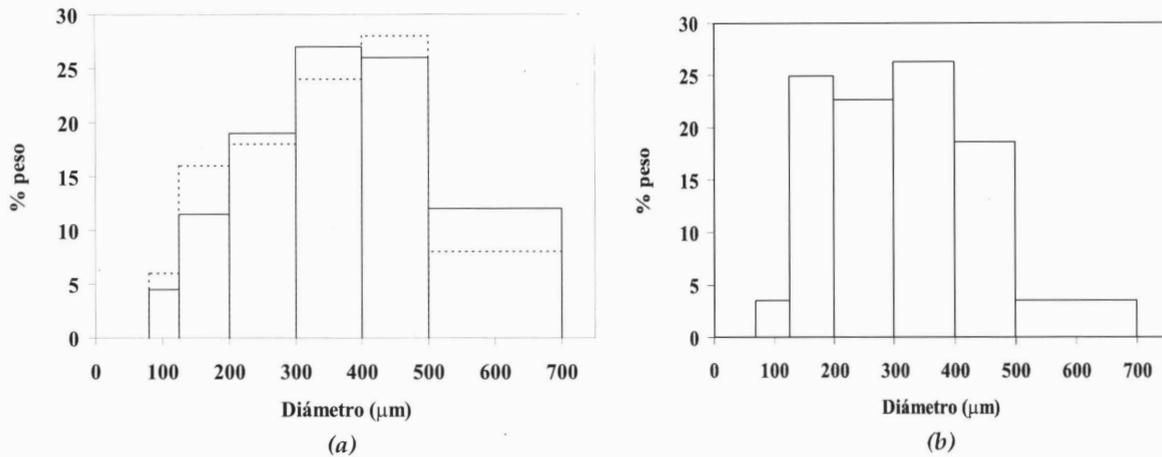


Figura 8. Distribución del tamaño de los gránulos del polvo atomizado empleado en la fabricación de soporte de cocción roja (—) y blanca (---) (a) y de gres porcelánico. (b)

### 3.2.- EQUIPOS UTILIZADOS

#### 3.2.1.-Células de cizalla

La función de flujo de los materiales (FFM) se obtiene mediante células de cizalla. Las más conocidas son la célula de Jenike, la anular y la rotacional [4, 5, 6]. En la figura 9 se ha representado la célula de cizalla de Jenike. Esta célula consiste en un anillo que se coloca sobre una base en cuyo interior se introduce el material a ensayar. Para garantizar la reproducibilidad de los ensayos, es necesario llenarla cuidadosamente y de forma repetitiva.

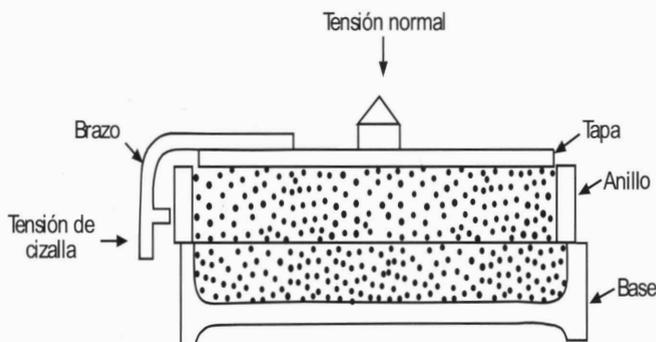


Figura 9. Célula de Jenike.

La célula de Jenike, aunque es más intuitiva y sencilla que las otras en su manejo, requiere tiempos de experimentación más largos, por lo que en este trabajo se ha utilizado una célula rotacional. En ésta última, la preparación de la muestra y la aplicación de las tensiones es similar a la de Jenike.

La célula rotacional (figura 10) consiste en una cavidad cilíndrica (base) sobre la que se coloca un anillo. El conjunto se llena con el polvo a ensayar. Posteriormente el sistema base-anillo se cubre con la tapa y se coloca solidariamente, mediante un enganche de bayoneta, sobre un soporte. El enganche está conectado a un motor que hace girar la base de la célula a una velocidad constante. La tapa superior se conecta a un cilindro que ejerce un esfuerzo normal sobre el polvo y transmite la tensión de cizalla a una célula de carga.

[4] INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS; *Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell*. European Federation of Chemical Engineers, publ. IchemE, Rugby, U.K. 1989.  
 [5]. CARR, J; WALKER, D.M. *An annular shear cell for granular materials*. Powder Technol., 1, 369-373, 1967/1968.  
 [6]. PESCHL, I. A. S. Z. *Equipment for the measurement of mechanical properties of bulk materials*. Powder handl. proces., 1(1), 73-81, 1989.

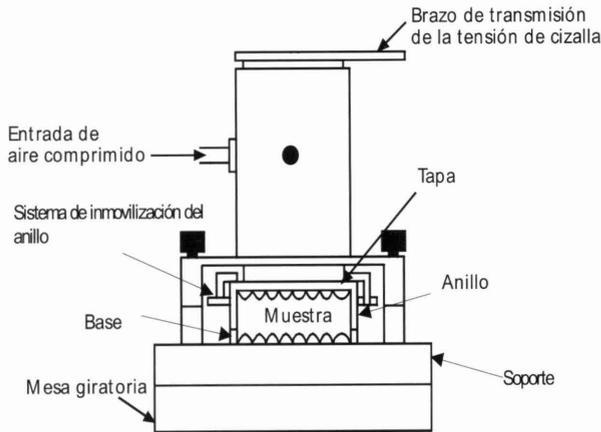


Figura 10. Célula rotacional.

más pequeño (de 1,5 m de altura), cilíndrico, con la zona de descarga troncocónica e intercambiable y con una boca de salida de 0.025 m de diámetro.

### 3.3.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para calcular las variables de diseño,  $D$  y  $\phi$ , es necesario determinar experimentalmente los siguientes parámetros: la función de flujo del material (FFM), el ángulo de fricción interna del material ( $\delta$ ) y el ángulo de fricción entre el material y la pared del silo ( $\phi$ ) [7, 8].

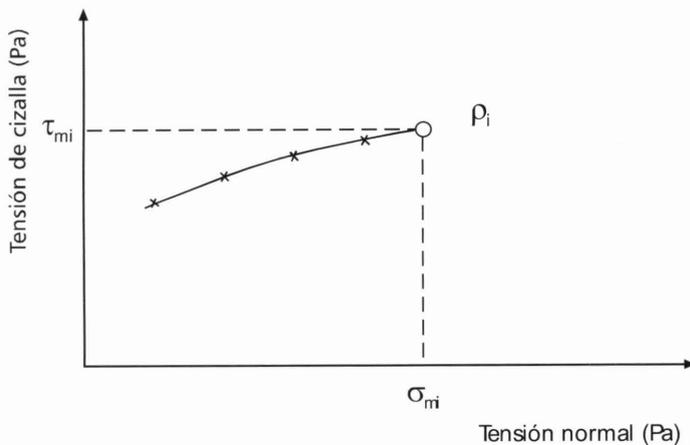


Figura 11. Curva de fluencia de un material pulverulento.

—Sobre el lecho de polvo se aplica una presión durante un periodo de tiempo controlado (presión de preconsolidación). A continuación se retira el accesorio, se enrasa el polvo a la altura del anillo, se tapa, se fija la base sobre el soporte y se inmoviliza el anillo.

—Se aplica la presión de consolidación programada ( $\sigma_{mi}$ ) sobre la tapa y, de forma

### 3.2.2-. Silos escala piloto

Para visualizar el flujo de material durante el llenado y la descarga de los silos se ha utilizado un silo metálico de sección semicircular, de 1.50 m de altura, cerrado en su cara plana con una superficie transparente de metacrilato. En este silo se puede cambiar la zona cónica de descarga para determinar el efecto del ángulo de esta sobre el tipo de flujo.

Para comprobar la validez de la metodología de diseño utilizada, se ha construido un silo de acero (AISI 304), similar a los industriales pero de tamaño

### 3.3.1-. Determinación de la función de flujo del material (FFM)

Se determina a partir de las curvas de fluencia medidas utilizando la célula de cizalla. Estas se obtienen siguiendo el siguiente procedimiento experimental:

—Sobre la base de la célula se coloca un anillo metálico junto con un accesorio que permite incrementar la altura de la cavidad cilíndrica del sistema base-anillo. El conjunto se llena con el polvo a ensayar.

[7] WILLIAMS, J.C.; *The storage and flow of powders*. In: RHODES, M. J., (ed.). Principles of powders technology. Chichester: John Wiley, 1990.

[8] SVAROVSKY, L. *Powder testing guide*. London: Elsevier. 1987.

simultánea se provoca el movimiento rotacional de la base a una velocidad constante. Este desplazamiento rotacional provoca un incremento progresivo de la tensión de cizalla, que actúa sobre el lecho de polvo en el plano situado entre la base y el anillo, hasta alcanzar un valor ( $\tau_{mi}$ ) al que se inicia el flujo del material.

—Posteriormente, sin extraer el polvo de la célula, se aplican sobre la tapa presiones inferiores ( $\sigma_i$ ) a la de consolidación ( $\sigma_{mi}$ ), repitiéndose el experimento descrito. De este modo se van obteniendo parejas de valores ( $\sigma_i, \tau_i$ ) que constituyen la curva de fluencia del lecho de polvo compactado a la tensión normal  $\sigma_{mi}$  (figura 11).

—Se repite el procedimiento descrito anteriormente pero aplicando presiones de consolidación diferentes (normalmente 5), para obtener un haz de curvas de fluencia del lecho de material compactando a diferentes presiones.

### 3.3.2.- Cálculo de la función de flujo del material (FFM)

Se puede demostrar, basándose en la aplicación del cálculo tensorial a la mecánica de suelos, que para un elemento de polvo deslizándose por el interior de un silo, por flujo másico, de compacidad  $\rho_i$ , el valor de la presión que consolida el lecho de polvo ( $p_i$ ) y su resistencia mecánica ( $f_i$ ) pueden calcularse a partir de la curva de fluencia obtenida para un lecho de polvo a la misma compacidad ( $\rho_i$ ) [9, 10, 11, 12].

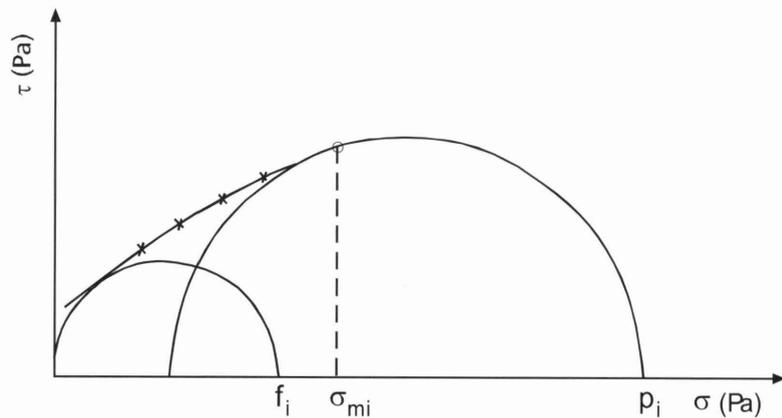


Figura 12. Determinación de un punto ( $p_i, f_i$ ) de la función de flujo.

En efecto, a partir de la curva de fluencia correspondiente a una compacidad del lecho  $\rho_i$ , obtenida aplicando una tensión de consolidación ( $\sigma_{mi}$ ), se trazan semicírculos tangentes a dicha curva que pasan por el origen de coordenadas y por el punto final de la misma (figura 12). Los puntos de corte de estos círculos con el eje de abscisas determinan los valores de la resistencia mecánica del lecho ( $f_i$ ) y de la presión de consolidación del mismo ( $p_i$ ).

Aplicando el mismo procedimiento para cada curva de fluencia se obtienen los pares de valores ( $p, f$ ) que constituyen la curva de fluencia del material. Dicha curva representa la resistencia mecánica del lecho ( $f$ ), a diferentes compacidades ( $\rho$ ) en función de la presión de consolidación a la que fueron obtenidas ( $p$ ).

[9] FEODOSIEV, V. I. *Resistencia de materiales*. 2ª ed. Moscú : Ed. Mir, 1980.  
 [10] ONODA, G. Y.; JANNEY, M. A; *Application of soil mechanics concepts to ceramics particulate processing*. In . Chin, G.Y. *Advances in Powders Technology*. Ohio: ASM, 1981.  
 [11] ATKINSON, J.H.; BRANSBY, P.L.; *The Mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics*. London: Ed. McGraw-Hill University Series in Civil Engineering, 1978  
 [12] BROWN, R.L.; RICHARDS, J.C.; *Principes of powder mechanics*. Pergamon Press, 1970

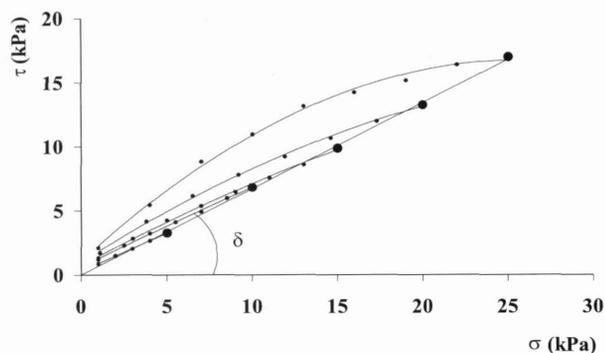


Figura 13. Ángulo de fricción interna ( $\delta$ ) del polvo atomizado.

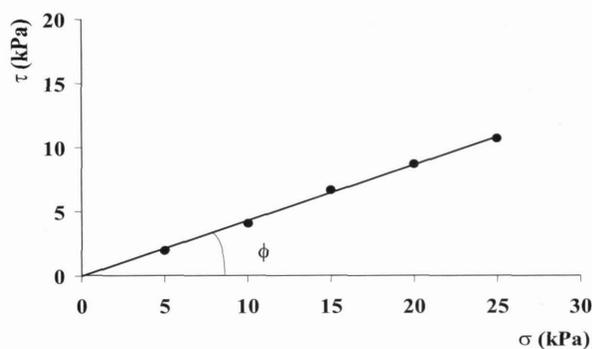


Figura 14. Ángulo de fricción polvo-silo ( $\phi$ ) para el polvo atomizado y una superficie metálica.

### 3.3.3.- Determinación del ángulo de fricción interna del material ( $\delta$ )

Se calcula a partir de las curvas de fluencia obtenidas con la célula de cizalla, según se ha descrito en el apartado 3.3.1. Su valor es el ángulo que forma la recta que pasa por los puntos finales de las curvas de fluencia con el eje de abscisas (figura 13).

### 3.3.4.- Determinación del ángulo de fricción entre la pared del silo y el material ( $\phi$ )

Para evaluar la fricción entre la superficie del silo y el material se realizan ensayos de cizalla en los cuales se sustituye la base de la célula por una superficie de la misma naturaleza que la pared del silo. La única diferencia con respecto al procedimiento experimental descrito en el apartado 3.3.1 es que las tensiones normales aplicadas son siempre crecientes.

La representación gráfica de la evolución de la tensión de cizalla que provoca la fluencia del material sobre la superficie del silo, en función de la presión aplicada, es una línea recta (figura 14). El ángulo que forma dicha recta con el eje de abscisas es  $\phi$ .

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- ESTUDIO DE LA SEGREGACIÓN POR TAMAÑOS DURANTE EL MANEJO DE UN POLVO AGLOMERADO. INFLUENCIA DEL TIPO DE FLUJO DURANTE LA DESCARGA DEL SILO SOBRE LA HOMOGENEIDAD DEL MATERIAL A LA SALIDA.

Durante el llenado de silos con un polvo aglomerado, y por tanto de fluidez elevada, suelen presentarse segregaciones si la distribución por tamaños es bastante heterogénea. Cuando un silo se llena vertiendo el material desde un punto fijo, que es la situación más habitual, el material se va acumulando en el punto de caída formando una pila. Los aglomerados pequeños son frenados por los huecos que quedan entre ellos formando una columna bajo el punto de llenado. Por el contrario, los grandes continúan desplazándose, rodando hacia los extremos del silo, concentrándose junto a las paredes del mismo.

Ahora bien, durante la descarga del silo, la mayor o menor homogeneidad del polvo

a la salida puede depender del tipo de flujo. En efecto, si el vaciado del silo se produce con flujo tubular los primeros aglomerados que se descargarán deben ser los más finos y los últimos los más gruesos, lo que debe provocar que la distribución del tamaño de gránulo del polvo a la salida varíe con el tiempo. Por el contrario si la descarga del silo se realiza por flujo másico, el efecto de mezcla que se produce en la boca de salida debe reducir o incluso eliminar en el material a la salida el efecto de la segregación producida durante la carga <sup>[13, 14, 15, 16]</sup>.

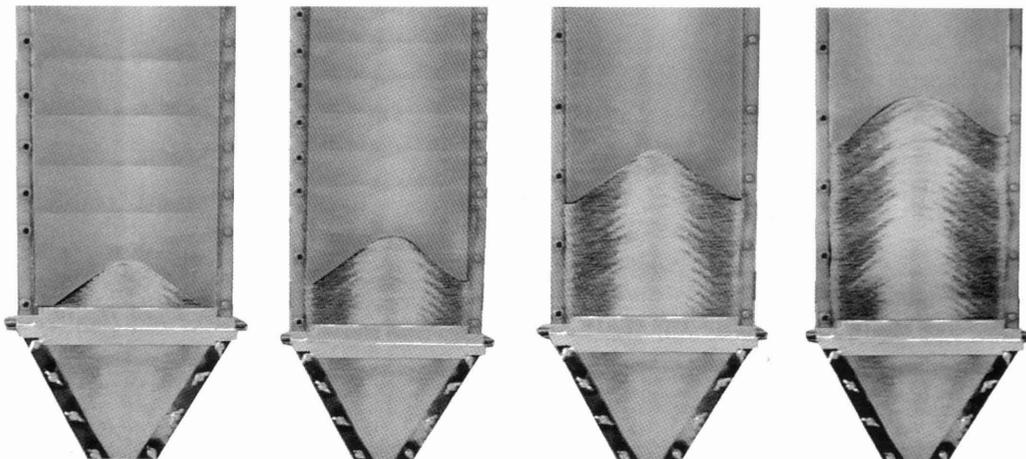


Figura 15. Secuencia de las imágenes de la carga de un silo.

#### 4.1.1.- Determinación visual de la segregación producida durante el llenado de un silo

Para estudiar la segregación que se desarrolla en la carga de silos con materiales granulares de elevada fluidez se utilizó una mezcla al 50% en peso de los esmaltes granulados de color y tamaño diferentes y el silo semicilíndrico antes descritos. En la figura 15 se muestran algunas de las imágenes más representativas, filmadas con una cámara de video. Se aprecia que manteniendo fijo el punto de carga, a medida que se va llenando el silo se va formando un montículo, en el que los gránulos más finos (blancos) se acumulan en el centro y los más gruesos (negros) son capaces de rodar sobre los otros, alcanzando las paredes del silo y concentrándose en esa zona, tal y como se había previsto.

#### 4.1.2.- Influencia del tipo de flujo durante la descarga del silo sobre las características del polvo a la salida

Se han realizado una serie de experimentos de carga y descarga utilizando el silo transparente anterior, la mezcla de esmaltes granulados antes citada y dos conos de descarga con ángulos de 16 y 25° para provocar los dos tipos de flujo. Durante la descarga se recogieron muestras del material en la boca de salida determinando su distribución por tamaños mediante tamizado vía seca.

[13] CARSON, J. W.; Royal, T.A.; Goodwill, D. J. *Understanding and eliminating particle segregation problems*. Bulk solids handl., 6(1), 139-144, 1986.

[14] GOODWILL, D. J. *Solving particle segregation problems in bins*. Process eng., 70(6), 49-50, 1989.

[15] WILLIAMS, J.C. *The design of solids handling plants to minimize the effects of particle segregation*. Powdex 92. Madrid, 7-8 Mayo 1992

[16] CLAGUE, K.; WRIGHT, H. *Minimising segregations in bunkers*. ASME Paper No 72-MH-16. Second Symposium on storage and flow of solids, Chicago. Sept. 1972.

En la figura 16 se ha representado la evolución del porcentaje de los aglomerados gruesos en la mezcla del polvo a la salida en función del tiempo, para los dos tipos de flujo.

Se comprueba que el tipo de flujo durante la descarga influye considerablemente sobre la constancia de las características del polvo a la salida. En efecto se confirma que, si durante la carga se han producido segregaciones y la descarga del silo tiene lugar mediante flujo tubular, las características del polvo a la salida van cambiando con el tiempo. Por el contrario si el flujo de descarga es másico, aunque durante la carga se haya producido el mismo grado de segregación que en el caso anterior, el material resultante a la salida prácticamente no cambia durante la descarga, debido al efecto de mezcla antes citado.

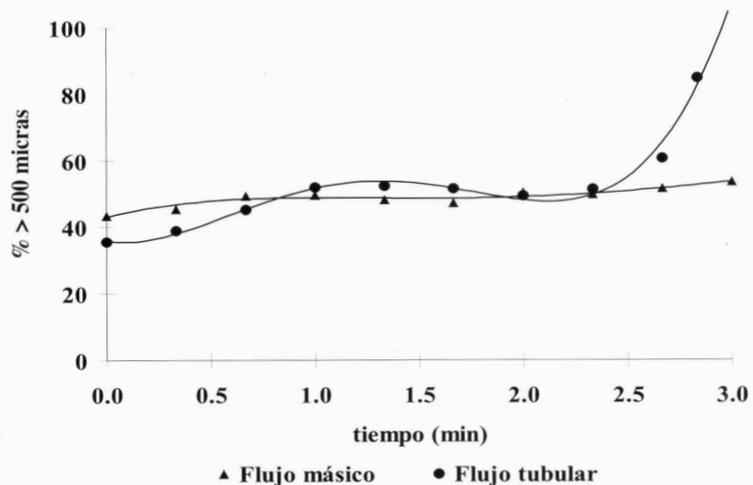


Figura 16. Influencia del tipo de flujo sobre la homogeneidad del polvo a la salida.

## 4.2.- DISEÑO DE SILOS QUE HAN DE CONTENER MATERIALES UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA

### 4.2.1.- Influencia de la naturaleza del polvo sobre los parámetros de diseño del silo

En este apartado se aplica la metodología anteriormente descrita al diseño de silos en los que la descarga del material debe realizarse por flujo másico por diferentes razones. En efecto en el polvo atomizado se dan las dos condiciones para que se produzcan segregaciones durante la carga del material en los silos: la distribución del tamaño de los gránulos es amplia (125-750  $\mu\text{m}$ ) y la fluidez del material elevada. En el caso concreto del polvo atomizado empleado en la fabricación de baldosas, la segregación por tamaños durante el llenado del silo, si el flujo de descarga es tubular, tendrá como efecto la variación de la fluidez del atomizado y de su contenido en humedad durante la descarga. Al principio se descargarán las partículas más finas, con menor fluidez y humedad, y al final se descargarán los gránulos más gruesos, con fluidez baja y alta humedad. En la fabricación de gres porcelánico, además de los inconvenientes anteriores, la heterogeneidad en la descarga conducirá a problemas de tonos en el producto final.

Para polvos de media y baja cohesividad, la problemática es sustancialmente distinta, ya que debido a la baja fluidez de estos materiales, no pueden presentarse segregaciones. El principal problema que suele aparecer en el manejo de estos materiales, es la interrupción del flujo durante la descarga del silo por formación de bóvedas o chimeneas (figura 1). Como ejemplo de estos materiales se han elegido el óxido de cinc y el cuarzo, con granulometrías similares a los utilizados en la fabricación de fritas y esmaltes.

En todos los casos, los problemas antes descritos, se reducen o eliminan si la descarga del silo es por flujo másico <sup>[17, 18, 19]</sup>. El método utilizado para determinar el diámetro

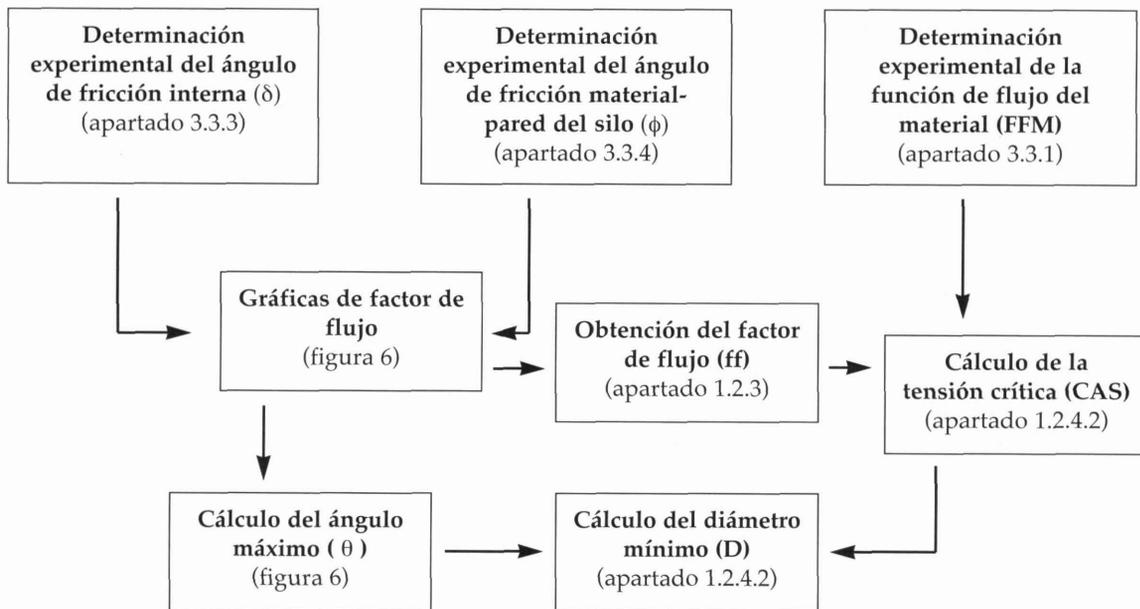


Figura 17. Diagrama de flujo del método de diseño seguido.

mínimo de la boca de salida (D) y el ángulo máximo que forma las paredes del silo en la zona de descarga con la vertical ( $\theta$ ), se esquematiza en la figura 17.

En la figura 18 se han representado las funciones de flujo de los tres polvos estudiados y en la tabla 2 se detallan los valores del ángulo de fricción interna del material ( $\delta$ ), del ángulo de fricción entre la pared del silo y el material ( $\phi$ ) y de la densidad del lecho ( $\rho$ ), correspondientes a estos polvos.

Material	Ángulo de fricción interna, $\delta$ (°)	Ángulo de fricción polvo-pared, $\phi$ (°)	Densidad, $\delta$ (k/m <sup>3</sup> )
Polvo atomizado	34	25	1050
Material	40	23	950
Óxido de Cinc	43	24	600

Tabla 2. Parámetros de diseño utilizados para los diferentes materiales

Del análisis de estos resultados se deduce que existe una relación directa entre el tamaño medio del polvo (constituido por aglomerados y partículas) y la fluidez del material reflejada en las correspondientes funciones de flujo. En efecto, el valor de la ordenada en el origen, denominado cohesividad, y el de la pendiente de estas representaciones, parámetros inversamente relacionados con la fluidez del polvo, aumentan considerablemente conforme se reduce el tamaño medio de las partículas o aglomerados de polvo.

[17] MARINELLI, J.; CARSON, J. W. *Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders*. Chem. Eng. Prog., 88(5), 22-28, 1992.  
 [18] PURUTYAN, H.; PITTENGER, B.; CARSON, J. W.; *Solve solids handling problems by retrofitting*. Chem. Eng. Prog., 94(4), 27-39, 1998.  
 [19] Schulze, D.; Schwedes, J.; *Storage and flow of bulk solids in silos and information for planning new instalations*. VGB Kraftwerkstechnik 70(9), 665-669, 1990.

De forma aproximada el valor de la cohesividad del polvo atomizado, el más grueso, es aproximadamente diez veces menor que la del más fino, óxido de cinc, y unas cuatro veces más pequeña a la del cuarzo, que es de tamaño intermedio.

El ángulo de fricción interna ( $\delta$ ), tabla 2, que también está relacionado con la fluidez del polvo, refleja esta misma tendencia aunque de forma menos acusada. En efecto, aunque la variación del tamaño medio del polvo es considerable, el valor del ángulo de fricción del polvo solo se altera en 9° sexagesimales.

Por lo que respecta al ángulo de fricción pared del silo-polvo ( $\phi$ ), su valor apenas se modifica, lo que parece indicar que para los polvos estudiados este parámetro prácticamente solo depende de la naturaleza de la superficie del silo.

A partir de los valores que se detallan en la tabla 2 y siguiendo el método esquematizado en la figura 17, se han calculado el ángulo máximo que forma la pared con la vertical ( $\theta$ ) y el diámetro mínimo de la boca de descarga del silo (D), para que el flujo en la descarga de estos materiales en un silo cilíndrico de paredes metálicas, sea másico. En la tabla 3 se recogen los valores de ambos parámetros.

Material	Ángulo máximo de la pared $\theta$ (°)	Diámetro mínimo de la zona de descarga, D (m)
Polvo atomizado	23	$\cong 0,02$
Material	21	0,45
Óxido de Cinc	20	4.20

Tabla 3. Parámetros de diseño de los silos calculados para los diferentes materiales

En esta tabla 3 se aprecia que el valor del ángulo máximo,  $\theta$ , para el cual el flujo de descarga del silo es másico, aumenta ligeramente conforme se incrementa la fluidez del polvo o su tamaño, como era de prever. El diámetro mínimo de la boca de salida, D, para que no se produzcan interrupciones del flujo por formación de bóvedas, aumenta considerablemente al disminuir la fluidez del polvo o su tamaño. Este parámetro es mucho más sensible a las características del polvo que el ángulo máximo de la zona de descarga ( $\theta$ ). En efecto, el valor del diámetro máximo calculado para el óxido de cinc es unas 200 veces mayor que el correspondiente al del polvo atomizado, mientras que la diferencia en los ángulos máximos ( $\theta$ ), es de apenas 3° sexagesimales.

El valor extremadamente elevado que se obtiene para el óxido de cinc (4.2 m), nos indica que es prácticamente imposible disponer de un silo cilíndrico de paredes metáli-

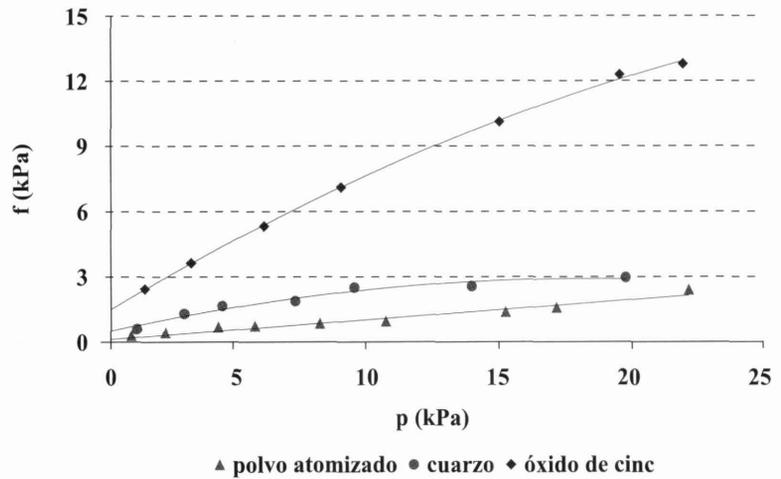


Figura 18. Funciones de flujo de los materiales estudiados.

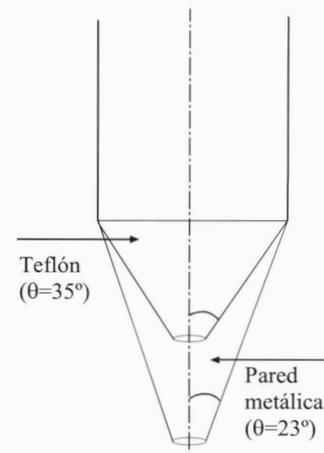
cas en el que la descarga de este polvo se realice por flujo másico sin formación de bóvedas. Así pues la descarga de silos que contengan materiales de alta cohesividad como el estudiado, necesitará ser asistida instalando sistemas que la faciliten, destruyendo de manera prácticamente instantánea las bóvedas que se vayan formando (vibradores, etc.).

**4.2.2.- Efecto de la naturaleza de la pared interna del silo sobre los parámetros de diseño**

Para determinar el efecto de la naturaleza de la superficie interna del silo sobre el ángulo máximo de la pared del cono ( $\theta$ ) y sobre el diámetro mínimo de la boca de salida ( $D$ ), se han realizado una serie de experimentos con el sistema teflón-polvo atomizado, para determinar el ángulo de fricción entre ambos materiales. Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado anterior (figura 17), se han determinado los parámetros de diseño para un silo con la pared interna revestida de teflón. En la tabla 4 se detallan los resultados obtenidos.

Parámetros de diseño	Material de la superficie interna de la pared	
	Teflón	METAL
Ángulo de fricción polvo-pared, $\phi$ (°)	15	25
Ángulo máximo de la pared, $\theta$ (°)	35	23
Diámetro mínimo de la boca de salida, $D$ (m)	$\cong 0.02$	$\cong 0.02$

*Tabla 4. Parámetros de diseño utilizados para los diferentes materiales.*



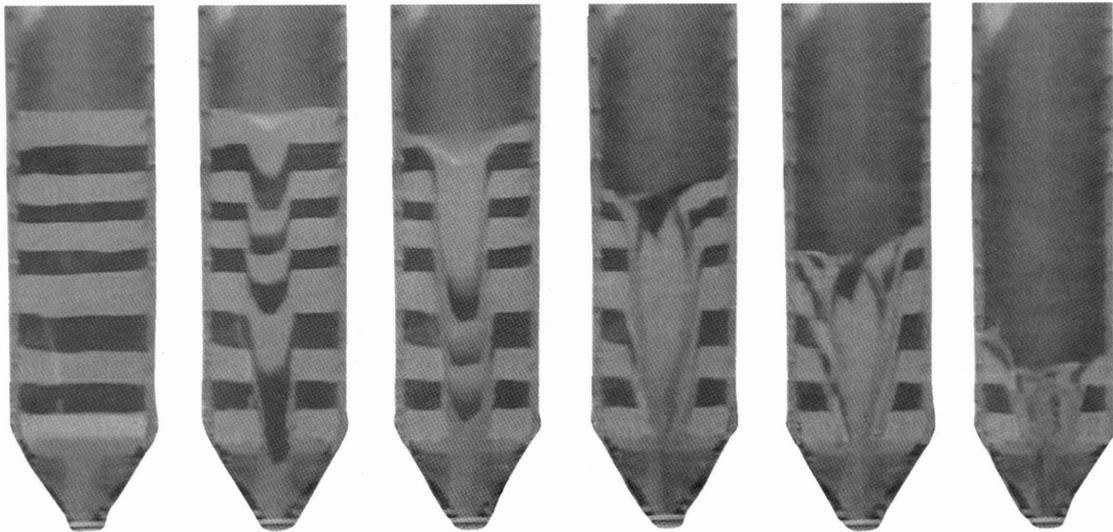
*Figura 19. Efecto de la naturaleza de la superficie sobre el ángulo máximo que debe tener la pared.*

Se confirma que, para el polvo atomizado estudiado, el ángulo máximo de la pared de la zona de descarga del silo ( $\theta$ ) aumenta considerablemente al reducirse la fricción entre el polvo y la superficie de la pared ( $\phi$ ), lo que incrementa la capacidad del silo sin que se modifique su altura (figura 19).

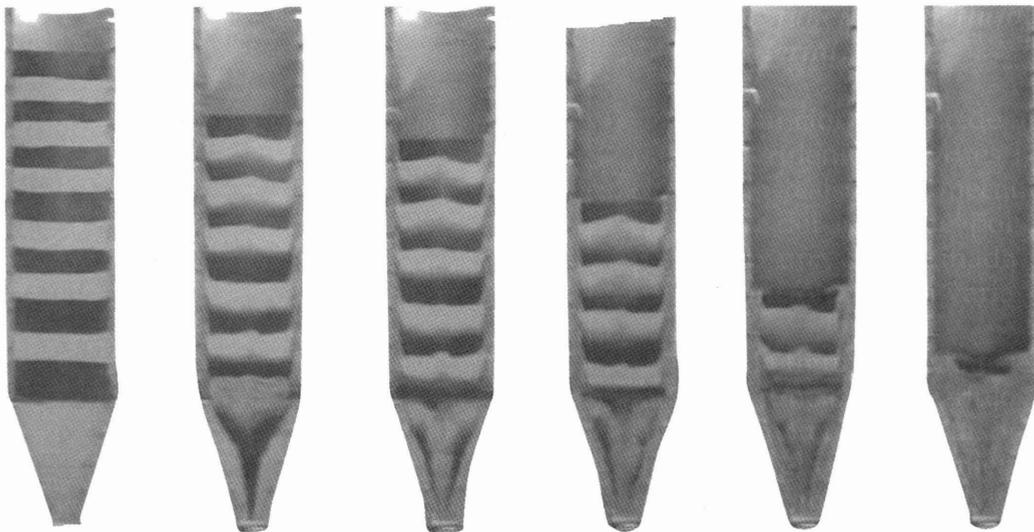
**4.3.-COMPROBACIÓN DE LA VALIDEZ DE LA METODOLOGÍA APLICADA PARA EL DISEÑO DE SILO**

A la vista de los valores del diámetro mínimo de boca de salida obtenidos para los diferentes materiales (tabla 3), para comprobar la validez del método de diseño expuesto, se han realizado una serie de experimentos con polvo atomizado, a escala piloto.

Se construyeron dos conos intercambiables, con ángulos de descarga de 18° y 26° respectivamente, por debajo y por encima del ángulo de diseño, para acoplarlos al silo semicircular antes descrito. Para visualizar el tipo de flujo de material durante la descarga se llenó el silo alternativamente con polvo atomizado de color rojo y blanco formando estratos de diferente color. La descarga del silo con los dos ángulos de cono se filmó con una videocá-



*Figura 20. Secuencia de imágenes de la descarga de silo con flujo tubular*



*Figura 21. Secuencia de imágenes de la descarga del silo con flujo másico.*

para. En las figuras 20 y 21 se detallan algunas de las imágenes más representativas.

Se comprueba que empleando un ángulo de cono ligeramente mayor al calculado, el flujo del polvo durante la descarga es tubular (figura 20), mientras que, al utilizar un ángulo de cono más pequeño al teórico el flujo es claramente másico (figura 21). Ambos resultados confirman la validez del método de diseño empleado.

## 5. CONCLUSIONES

Del estudio realizado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Si durante el llenado de un silo se mantiene constante el punto de carga, situación bastante habitual, se produce la segregación del sólido, debido a las diferentes trayectorias que siguen las partículas en función de su tamaño. Este problema se incrementa al aumenta la fluidez del material y la diferencia en el tamaño de las partículas que lo forman.
- La variación en las características del polvo a la salida del silo, debida a las segregaciones producidas durante la carga del mismo en los silos, se reduce o elimina si durante la descarga el flujo del polvo es másico, lo cual depende del ángulo de la zona de descarga. Para el polvo atomizado empleado en este trabajo este ángulo resultó ser, para un silo cilíndrico y metálico, de  $23^\circ$ .
- La descarga continuada de un material cohesivo puede conseguirse si se diseña un silo en el que el flujo de descarga sea másico y el diámetro del orificio de vaciado el adecuado. Ambos parámetros pueden obtenerse conociendo el comportamiento reológico del material y aplicando la metodología de diseño de silos.
- Las propiedades superficiales de la pared del silo influyen sobre el diámetro del orificio de salida y sobre el ángulo de flujo másico. Al aumentar el ángulo de fricción entre el material a almacenar en el silo y la pared de éste, se incrementa el diámetro mínimo necesario para que no se produzcan bóvedas y disminuye el ángulo máximo de flujo másico.