

Projeto de Silos para o Armazenamento de Materiais na Forma de Pó. Problemas Associados à Etapa de Descarga.

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

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC)

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)

Universitat Jaume I. Castellón. España.

Resumo: Nos processos de fabricação de revestimentos, fritas e pigmentos cerâmicos são manejadas grandes quantidades de materiais na forma de pó de diferentes naturezas, que devem ser armazenados e descarregados de forma conveniente. Durante a descarga destes materiais podem ocorrer interrupções de fluxo devido à formação de grumos nos silos, segregações do material devido ao seu tamanho, etc. Alguns destes problemas podem ser minimizados ou até eliminados a partir de um desenho adequado do silo. Neste trabalho foi aplicada a teoria de Jenike no desenho de silos para três tipos de materiais na forma de pó: massa atomizada, empregada na fabricação de grês porcelanato, óxido de zinco e quartzo, empregados na fabricação de fritas cerâmicas. Para estes materiais foi calculado o ângulo máximo que deve ser formado entre a parede e a vertical na zona de descarga do silo e o diâmetro mínimo para que o fluxo do material durante a descarga seja o adequado e ocorra sem interrupções. Ainda foi analisada a influência da superfície do silo sobre o tipo de fluxo. Finalmente, foram realizados experimentos para verificar a utilidade da metodologia empregada para o desenho de silos.

Palavras-chaves: *silos, projeto e desenho, comportamento reológico, massas cerâmicas*

1. Introdução

No processo de fabricação de produtos cerâmicos a maior parte das matérias-primas utilizadas encontra-se na forma de materiais sólidos em pó. O consumo destes materiais no setor espanhol de revestimentos cerâmicos é estimado em cerca de 40.000 toneladas/dia, daí a importância de conhecer seu comportamento reológico durante as etapas de carga e descarga destes materiais nos locais de armazenamento (tipicamente silos).

O comportamento reológico dos materiais na forma de pó é tão complexo que não pode ser tratado como o dos líquidos ou suspensões, nem como o dos sólidos. Isto faz com que ocorram, freqüentemente, problemas em seu manejo: segregações, interrupções no fluxo durante a descarga dos materiais dos silos, descarga descontrolada de sólidos, etc., que podem afetar negativamente o processo produtivo. Este problema pode ser minimizado se a descarga dos materiais nos silos de armazenamento é feita de

forma adequada. A descarga do material na forma de pó pode se dar de duas maneiras: tubular ou mássica. A existência de um tipo de fluxo ou outro dependerá da natureza do material na forma de pó, bem como do recipiente que o contém. Como conseqüência, para desenhar um silo com um determinado tipo de fluxo não de ser consideradas conjuntamente as características do material e as do próprio silo.

1.1 Tipos de Fluxo

1.1.1 Fluxo tubular

O fluxo tubular consiste na formação de um canal de fluxo, alinhado com a boca de saída do silo, rodeado por uma zona na qual o material permanece inicialmente estático (Figura 1). Durante a descarga do silo, se o material é pouco coeso, a parte mais alta, em contato com as paredes, vai desmoronando, alimentando o canal central. Se o material é muito coeso, o esvaziamento do silo pode chegar a ser interrompido, com a formação de um canal central va-

zido, cercado por material estático.

Na descarga de um silo pelo mecanismo de fluxo tubular o material não se move todo de uma vez, o que faz com que a quantidade de material na saída e a densidade aparente do fluxo de material resultante vá se modificando durante o transcurso da operação. Inclusive, quando o silo se encontra praticamente vazio, existe em seu interior material que ainda permanece na posição inicial. Este material, acumulado nas zonas mortas do silo, não só diminui sua capacidade efetiva como pode inclusive se converter em material imprestável se alterar suas propriedades com o decorrer do tempo (por secagem, oxidação, etc.). Além disto, este tipo de fluxo acentua os efeitos negativos derivados da falta de homogeneidade do material armazenado, devido à segregação por tamanhos que pode ocorrer durante o preenchimento.

Uma das poucas vantagens deste tipo de fluxo é o menor desgaste que sofrem as paredes do silo, já que o atrito entre a parede e o pó durante o descarregamento é desprezível. Ainda, as pressões a que as paredes deste tipo de silo são submetidas são menores, necessitando, portanto, de uma quantidade menor de material para sua construção.

1.1.2 Fluxo mássico

Este tipo de fluxo é caracterizado pelo fato de todo o material se mover conjuntamente durante a operação de descarga. Particularmente, o material em contato com as paredes desliza sobre estas, fluindo junto com o resto. Desde o início da descarga nenhuma partícula ou aglomerado permanece em sua posição original, todas se movendo, impedindo a formação de zonas mortas. O material que entra

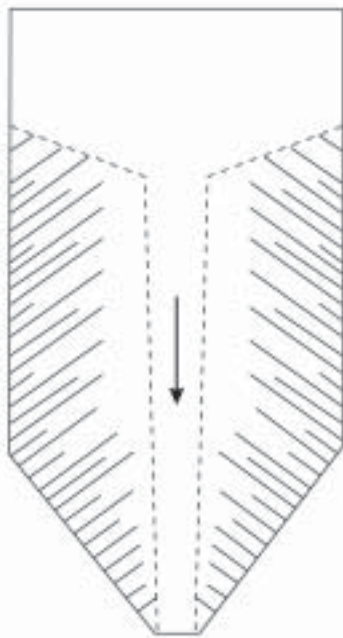


Figura 1. Fluxo tubular.

primeiro é o primeiro a sair (first in – first out), o que tende a manter constante o tempo de residência ou permanência do material no silo em um processo contínuo.

A descarga de um silo por fluxo mássico não é interrompida pela formação de canais, uma vez que todo o material se move de uma vez. Além disto, as tensões que aparecem durante a descarga do silo são previsíveis, o que faz com que possa ser desenhado para que não se formem arcos que interrompam o fluxo.

A quantidade (vazão) da descarga e a densidade do fluxo de material durante o esvaziamento são menos variáveis que no caso do fluxo tubular. Outra vantagem não menos importante deste tipo de fluxo é a redução ou eliminação dos problemas associados à segregação que podem ocorrer durante o carregamento. O fato de todo material se mover de uma vez provoca uma certa mistura que tende a aumentar a homogeneidade da massa na saída. De fato, em certas ocasiões, os silos de fluxo mássico são aconselhados para a mistura de sólidos.

1.2 Desenho (ou Projeto) de Silos

Consiste em determinar o valor do ângulo máximo formado entre as paredes do silo e a vertical na região de descarga, θ , e o valor do tamanho mínimo da boca de saída, D , para os quais a descarga é realizada por fluxo mássico sem interrupções (Figura 3).

1.2.1 Considerações iniciais

1.2.1.1 Obstruções da boca de saída

O tamanho da boca de saída de um silo deve ser suficientemente grande para que não seja obstruído durante seu

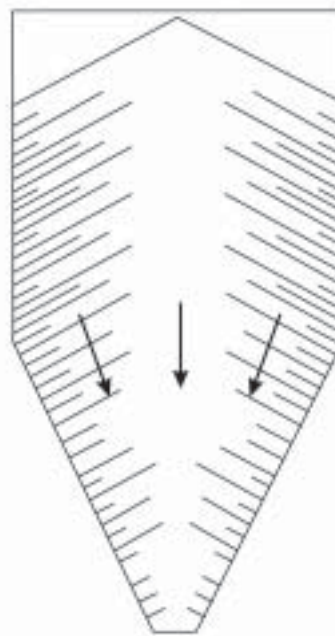


Figura 2. Fluxo mássico.

Tabela I. Comparação entre fluxo mássico e fluxo tubular. Vantagens.

| Fluxo mássico | Fluxo tubular |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• elimina a possibilidade de obstruções do fluxo• minimiza os efeitos associados à segregação por tamanhos• renovação do material (não existem zonas mortas)• o fluxo é uniforme e fácil de controlar• a densidade do fluxo durante a descarga é praticamente constante• toda a capacidade de armazenamento é aproveitada | <ul style="list-style-type: none">• para uma mesma capacidade, a altura necessária é menor• as pressões aplicadas às paredes são menores• a abrasão sobre as paredes é menor |

descarregamento. Este fenômeno pode ocorrer devido à formação de grumos (pelotas), se o pó é coeso (coesividade), ou a obstrução (entupimento) pela formação de estruturas, se as partículas são suficientemente grandes.

Para evitar a interrupção do fluxo pelo segundo mecanismo, basta que a boca de saída seja de uma ordem de grandeza maior que a das partículas ou aglomerados que constituem o pó. Já o cálculo do diâmetro de saída, que evita as interrupções pelo primeiro mecanismo, é mais trabalhoso e se baseia na teoria desenvolvida por Jenike^{1,2,3} durante a década de 60, da qual alguns aspectos serão tratados na seqüência.

1.2.1.2 Requisitos a serem observados para evitar as interrupções de fluxo

Analisemos o que acontece a uma partícula do pó (elemento) em contato com a parede do silo durante a descarga do mesmo (Figura 4). Quando o elemento se encontra

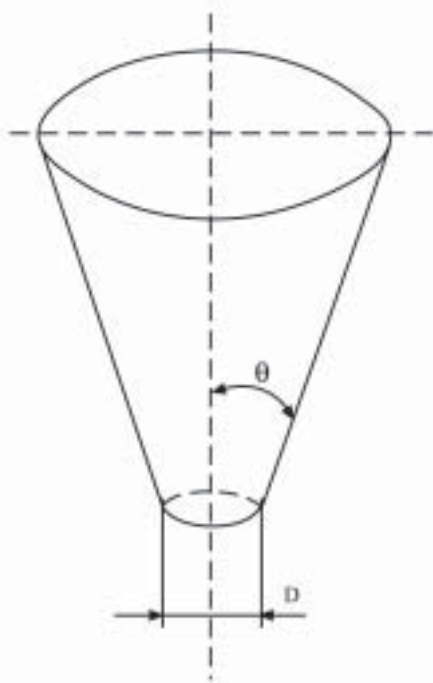


Figura 3. Variáveis de desenho

no alto do silo, está descompactado ($p = 0$), já que sobre ele não atua nenhuma pressão. Na medida em que vai descendo, vai se compactando, devido a que a pressão existente no silo (p) vai aumentando. Como pode ser visto na Figura 4, inicialmente a pressão aumenta muito com a profundidade, até se aproximar do final da vertical do silo, onde permanece praticamente constante. Na interseção entre a parede vertical e a inclinada, a pressão aumenta de forma abrupta. A partir deste ponto, vai se reduzindo na medida em que o material se aproxima da boca de saída.

A resistência mecânica ao cisalhamento de um material (f) apresenta uma variação similar à da pressão, uma vez que esta propriedade do fluxo é função da compactação, a qual por sua vez depende da pressão a que está submetido o material que, conforme acabamos de ver, varia com a posição. Portanto, durante a descarga, a resistência mecânica ao cisalhamento do material se alterará de acordo com sua posição no silo. Por outro lado, a partícula de pó da qual estamos tratando está submetida a todo o momento a uma tensão máxima de cisalhamento (s), cuja magnitude depende de sua posição no silo, tal qual representado na Figura 4.

No exemplo representado na Figura 4.a., em todo instante a tensão máxima de cisalhamento a que está submetida a partícula de pó (s) é maior que sua resistência mecânica ao cisalhamento (f), o que faz com que durante a descarga não se formem grumos que interrompam o fluxo.

Por outro lado, se o tamanho da boca do silo é reduzido de D_1 para D_2 (Figura 4.b.) mantendo-se constantes as demais variáveis (ângulo da parede, tipo de pó, etc.) de maneira que para algum ponto do sistema se verifique a condição de que o valor da resistência mecânica ao cisalhamento do material (f) seja superior à tensão máxima de cisalhamento a que está submetido (s), neste ponto se formará um grumo. Desta forma, o diâmetro da boca de saída, D , que corresponde ao ponto de interseção das linhas f e s da Figura 4.b., é o diâmetro mínimo para o qual não se formam grumos.

1.2.2 A Função de Fluxo de um material (FFM)

A função de fluxo de um material na forma de pó (FFM)

é a variação da resistência mecânica ao cisalhamento (f) do pó compactado a uma determinada pressão (p), em função desta variável (p).

Na Figura 5 são apresentadas as funções de fluxo de uma série de materiais. Esta propriedade determina o comportamento reológico de um material na forma de pó para diferentes pressões de compactação, o que faz com que seja considerada uma medida de fluidez. De fato, quanto maior é a ordenada na origem e a inclinação da curva representada, menor é a fluidez do pó. A obtenção da função de fluxo de um material na forma de pó é realizada mediante ensaios de cisalhamento que serão descritos no item 3.3.1.

1.2.3 O fator de fluxo do sistema silo-material (ff)

O fator de fluxo (ff) de um sistema silo-material na forma de pó é a representação da tensão de cisalhamento máxima (s) que atua sobre uma partícula de pó armazenada no silo diante da pressão a que está submetida. Jenike verificou que, dentro de cada sistema, o quociente entre ambos valores é constante.

O cálculo do fator de fluxo (ff) supõe a resolução das equações diferenciais representativas das tensões que surgem nos silos durante a descarga. Tais resoluções foram publicadas por Jenike, para silos de diferentes geometrias, na forma de gráficos denominados habitualmente de gráficos de fatores de fluxo (Figura 6).

O fator de fluxo (ff), diferentemente da função de fluxo do material (FFM), é uma propriedade do sistema silo-material, dependendo de algumas características de ambos. Para calcular o fator de fluxo do sistema é necessário conhecer: o ângulo efetivo de fricção interna do pó (δ), o ângulo de fricção entre o material e a superfície do silo (ϕ), o ângulo da

parede na região de descarga do silo (θ) e a geometria do silo. O valor do ângulo efetivo de fricção interna do material (δ) e do ângulo de fricção entre o material e a superfície do silo (ϕ) são determinados mediante ensaios de cisalhamento que serão descritos nos itens 3.3.3 e 3.3.4.

1.2.4 Cálculo das variáveis de projeto

1.2.4.1 Cálculo do ângulo máximo da parede do silo na zona de descarga (θ)

Para calcular θ se recorre aos gráficos de fator de fluxo (Figura 6). A região triangular destes gráficos representa as condições para as quais o fluxo do material durante a descarga ocorre na modalidade mássica, de acordo com a teoria de Jenike.

A linha tracejada, que separa as duas regiões, determina as condições limite do sistema. De fato, esta linha representa os pares de valores ângulo máximo da parede do silo (θ) e ângulo de fricção do sistema pó-parede (ϕ) para

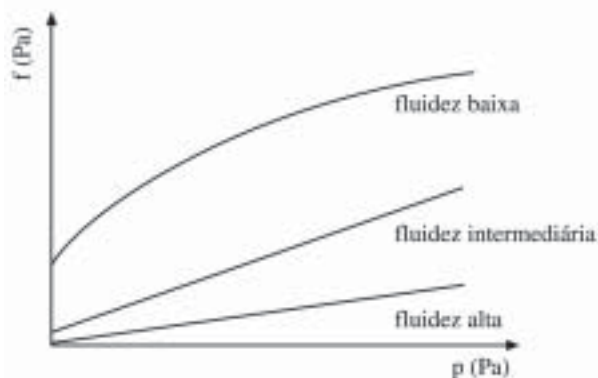


Figura 5. Funções de fluxo para diferentes materiais.

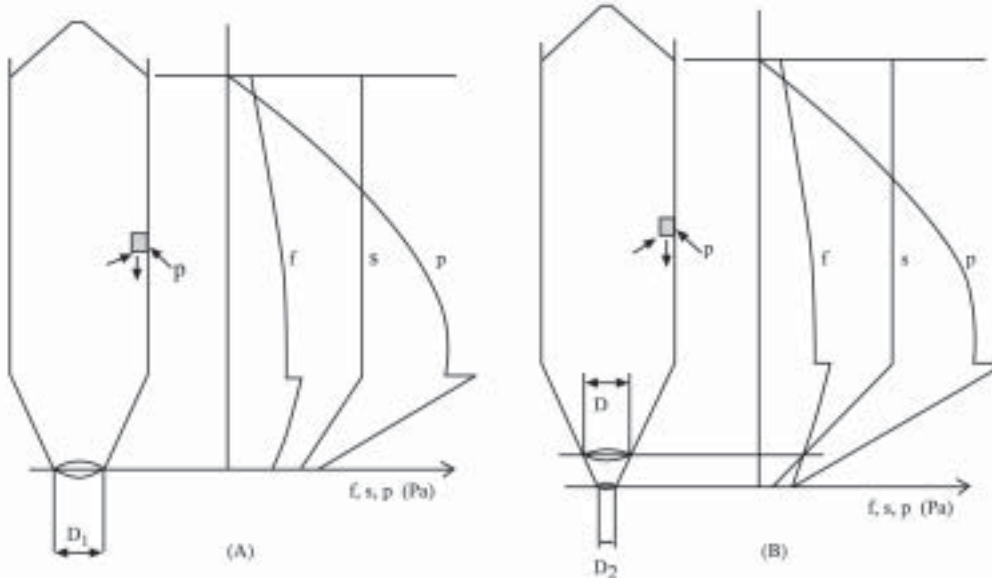


Figura 4. Distribuição da pressão (p), da resistência mecânica ao cisalhamento do pó (f) e da tensão de cisalhamento (s) no interior de um silo.

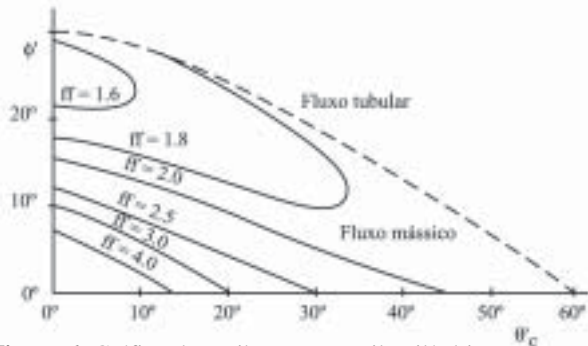


Figura 6. Gráfico de Jenike para um silo cilíndrico e para um ângulo de fricção interna δ de 30° .

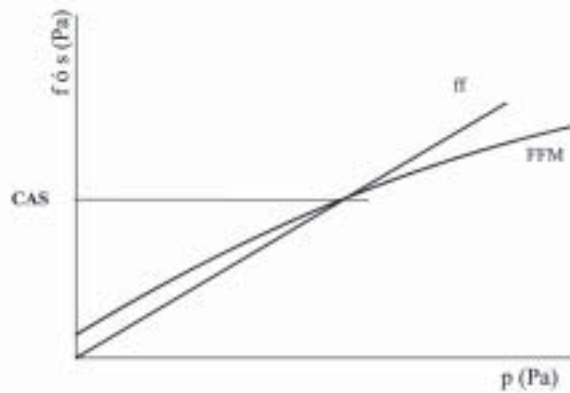


Figura 7.

os quais o fluxo é mássico. Como fator de segurança é aconselhável adotar um ângulo 3° inferior ao estimado.

1.2.4.2 Cálculo do diâmetro mínimo da boca de saída (D)

De acordo com a Figura 4, quando são representadas conjuntamente a função de fluxo do material (FFM) e a inversa do fator de fluxo do sistema ($1/ff$) (ver Figura 7), a interseção entre ambas representações cumpre a condição de fluxo $s=f$, ou seja, neste ponto a tensão máxima de cisalhamento a que está submetido o pó (s) é igual à resistência mecânica do sistema (f). Esta tensão é denominada tensão crítica (CAS), e seu valor é utilizado para calcular o tamanho mínimo do orifício de saída do silo. Para um silo cônico com abertura circular, o tamanho mínimo do orifício de saída (D) é dado pela seguinte expressão:

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

onde:

D: diâmetro do orifício de saída (m)

θ : ângulo entre a vertical e a parede do silo na região de descarga ($^\circ$)

CAS: tensão crítica (Pa)

ρ : densidade do pó (kg/m^3)

2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é aplicar a metodologia antes exposta, baseada na teoria de Jenike, ao projeto de silos que vão conter materiais na forma de pó empregados na indústria cerâmica com vistas a:

- reduzir os problemas gerados pela segregação por tamanhos de massas atomizadas;
- facilitar a descarga de materiais de elevada coesão utilizados no processo de fabricação de fritas;
- analisar a influência exercida pela superfície do silo sobre o comportamento do material durante sua descarga.

3. Materiais, Equipamentos e Procedimento Experimental

3.1 Materiais Empregados

Para observar visualmente a segregação por tamanhos foi utilizada uma mistura de dois esmaltes granulados de diferentes tamanhos e cores: um mais grosso, de cor negra e tamanho superior a $500 \mu\text{m}$, e o outro mais fino, de cor branca e tamanho inferior a $500 \mu\text{m}$. Os tamanhos médios de ambos granulados foram $800 \mu\text{m}$ e $350 \mu\text{m}$, respectivamente.

Para estudar o comportamento de materiais de fluidez elevada foram empregados três tipos de massas atomizadas empregadas na fabricação de revestimentos: grês porcelanato, suporte de queima branca e suporte de queima vermelha. Suas distribuições granulométricas são apresentadas na Figura 8.

Para estudar a descarga de materiais de coesão média e elevada foi empregado um quartzo e um óxido de zinco empregados habitualmente como matérias-primas na fabricação de fritas. O tamanho médio, determinado pelo difração de raios laser, para o quartzo foi de $40 \mu\text{m}$ (quartzo SE-6) e para o óxido de zinco foi de $2 \mu\text{m}$.

3.2 Equipamentos Utilizados

3.2.1 Células de cisalhamento

A função de fluxo dos materiais (FFM) é obtida através de células de cisalhamento. As mais conhecidas são a célula de Jenike, a anular e a rotacional^{4,5,6}. Na Figura 9 é representada a célula de cisalhamento de Jenike. Esta célula consiste de um aro colocado sobre uma base, em cujo interior se coloca o material a ser ensaiado. Para garantir a reprodutibilidade do ensaio é necessário que o preenchimento seja feito cuidadosamente e de forma repetitiva.

A célula rotacional (Figura 10) consiste em uma cavidade cilíndrica (base) sobre a qual se coloca um aro. O conjunto é preenchido com o material que se deseja ensaiar. Posteriormente, o sistema base-aró é coberto com a tampa e então é colocado, através de um encaixe, sobre um

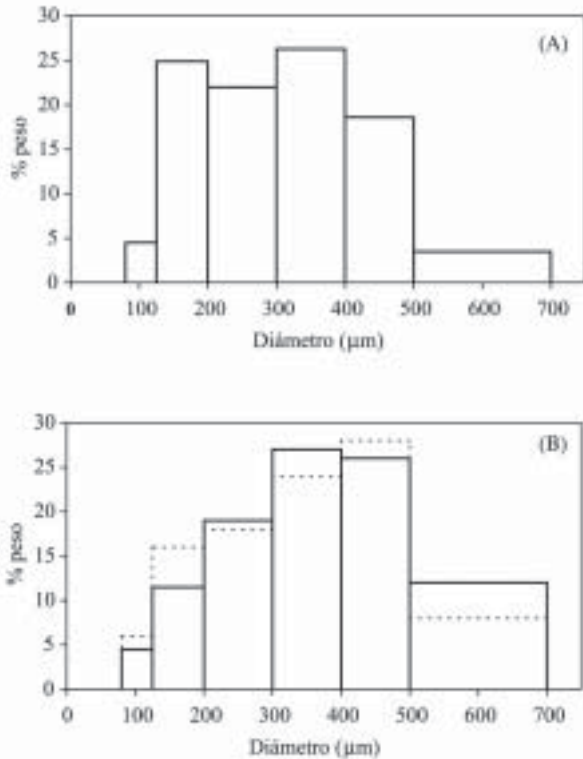


Figura 8. Distribuições granulométricas das massas atomizadas empregadas na fabricação de suportes de queima vermelha (---) e branca (—)(a) e de grês porcelanato (b).

suporte. O encaixe está acoplado a um motor que faz girar a base da célula a uma velocidade constante. A tampa superior fica conectada a um cilindro que exerce um esforço normal sobre a amostra e transmite a tensão de cisalhamento a uma célula de carga.

3.2.2 Silos em escala piloto

Para visualizar o fluxo do material durante o preenchimento e a descarga dos silos foi utilizado um silo metálico de secção semicircular, de 1,50 m de altura, fechado em sua face plana com uma placa polimérica transparente. Neste silo podem ser feitas variações da região cônica para determinar o efeito do ângulo desta sobre o tipo de fluxo.

Para comprovar a validade da metodologia de desenho utilizada foi construído um silo de aço (AISI 304), análogo aos industriais, porém de tamanho menor (1,5 m de altura), cilíndrico, com a zona de descarga cônica e intercambiável, e com uma boca de saída de 25 cm de diâmetro.

3.3 Procedimento Experimental

Para calcular as variáveis de desenho, D e ϕ , é necessário determinar experimentalmente os seguintes parâmetros: a função de fluxo do material (FFM), o ângulo de fricção interna do material (δ) e o ângulo de fricção entre o mate-

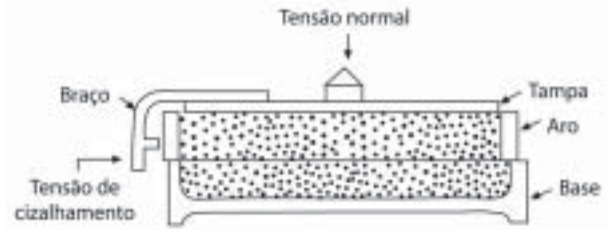


Figura 9. Célula de Jenike.

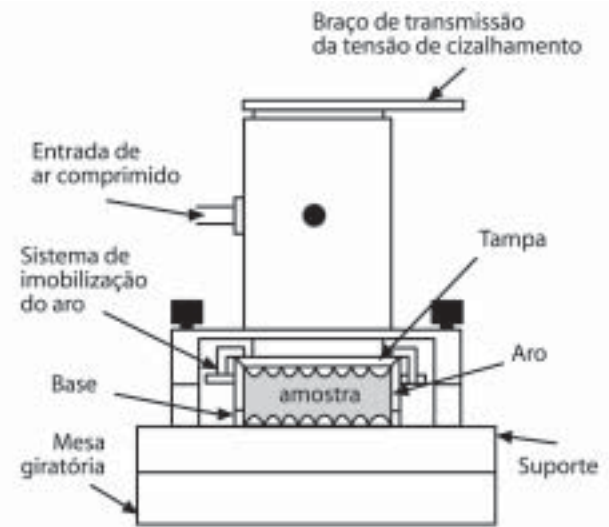


Figura 10. Célula rotacional.

rial e a parede do silo (ϕ)^{7,8}.

3.3.1 Determinação da função de fluxo do material (FFM)

É determinada a partir das curvas de fluência medidas com o emprego da célula de cisalhamento. Estas curvas são obtidas seguindo-se o seguinte procedimento experimental:

- Sobre a base da célula é colocado um aro metálico junto com um acessório que permite aumentar a altura da cavidade cilíndrica do sistema base-aro. O conjunto é preenchido com o pó a ser ensaiado.
- Aplica-se então sobre a amostra uma pressão durante um determinado período de tempo (pressão de pré-consolidação). Na seqüência é retirado o acessório, se nivela a amostra na altura do aro, tampa-se, fixa-se a base sobre o suporte e imobiliza-se o aro.
- Aplica-se a pressão de consolidação programada (σ_{mi}) sobre a tampa e simultaneamente se provoca o movimento rotacional da base com uma velocidade constante. Este deslocamento rotacional provoca um aumento progressivo da tensão de cisalhamento, que atua sobre a amostra no plano situado entre a base e o aro, até atingir um valor (τ_{mi}) no qual se inicia o fluxo do material.

- Posteriormente, sem retirar a amostra da célula, aplica-se sobre a tampa pressões inferiores (s_i) à pressão de consolidação (σ_{mi}), repetindo-se o procedimento descrito. Deste modo vão sendo obtidos pares de valores (σ_i, τ_i) que constituem a curva de fluência do pó compactado à tensão normal σ_{mi} (Figura 11).
- O procedimento descrito anteriormente é repetido aplicando-se pressões de consolidação diferentes (normalmente 5), para obter um conjunto de curvas de fluência do material compactando em diferentes pressões.

3.3.2 Cálculo da função de fluxo do material (FFM)

Podem ser demonstrados, com base na aplicação de cálculos de tensões empregados em mecânica dos solos, que para uma partícula de pó que desliza no interior de um silo, por fluxo mássico, de compactidade r_i , o valor da pressão que consolida o material (p_i) e sua resistência mecânica (f_i) podem ser calculados a partir da curva de fluência obtida para uma amostra com a mesma compactidade (ρ_i)^{9,10,11,12}.

Assim, a partir da curva de fluência correspondente a uma determinada compactidade do pó r_i , obtida com a aplicação de uma tensão de consolidação (σ_{mi}), são traçados dois semicírculos tangentes à curva de fluência. Um, passando pela origem da coordenada y , e outro passando pelo ponto final da curva (Figura 12). Os pontos de interseção destes semicírculos com o eixo das abscissas determinam os valores da resistência mecânica do material (f_i) e da pressão de consolidação do mesmo (p_i).

Aplicando o mesmo procedimento para cada curva de fluência são obtidos os pares de valores (p, f) que constituem a curva de fluência do material. Esta curva representa a resistência mecânica do material (f) para diferentes compactidades (r) em função da pressão de consolidação em que foram obtidas (p).

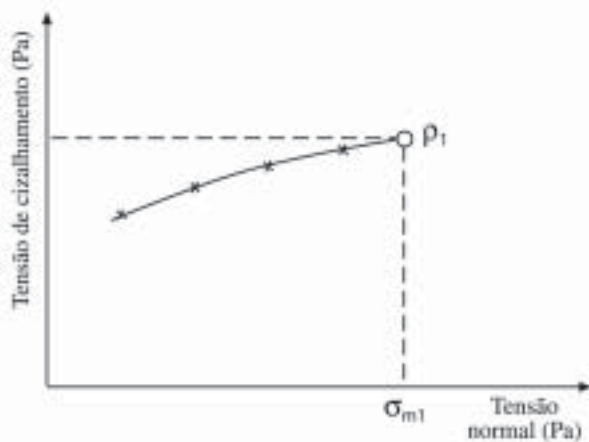


Figura 11. Curva de fluência de um material na forma de pó.

3.3.3 Determinação do ângulo de fricção interna do material (δ)

É calculado a partir das curvas de fluência obtidas com a célula de cisalhamento, de acordo com o descrito no item 3.3.1. Seu valor é representado pelo ângulo formado pela reta que passa pelos pontos finais das curvas de fluência com o eixo das abscissas (Figura 13).

3.3.4 Determinação do ângulo de fricção entre a parede do silo e o material (ϕ)

Para avaliar a fricção entre a superfície do silo e o material são realizados ensaios de cisalhamento nos quais se substitui a base da célula por uma superfície da mesma natureza da parede do silo. A única diferença com relação ao procedimento experimental descrito no item 3.3.1 é que as tensões normais aplicadas são sempre crescentes.

A representação gráfica da evolução da tensão de cisalhamento que provoca a fluência do material sobre a superfície do silo, em função da pressão aplicada, é uma linha reta (Figura 14). O ângulo formado por esta reta com o eixo das abscissas representa ϕ .

4. Resultados e Discussão

4.1 Estudo da Segregação por Tamanhos Durante o Manejo de um Pó Aglomerado. Influência do tipo de Fluxo Durante o Descarregamento do Silo Sobre a Homogeneidade do Material na Saída.

Durante o preenchimento do silo com um pó aglomerado, conseqüentemente de fluidez elevada, podem ocorrer segregações se a distribuição de tamanhos é bastante heterogênea. Quando um silo é carregado vertendo-se o material a partir de um ponto fixo, que é a situação mais comum, o material vai sendo acumulado no ponto de queda formando uma pilha. Os aglomerados pequenos são freados pelos interstícios que se formam entre as partículas formando uma coluna abaixo do ponto de queda. Por sua vez, os aglomerados maiores continuam a deslizar, che-

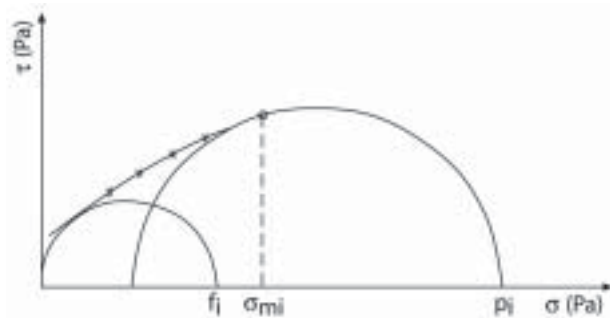


Figura 12. Determinação de um ponto (p, f) da função de fluxo.

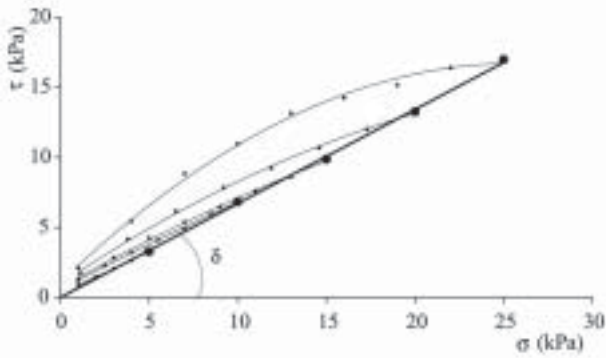


Figura 13. Ângulo de fricção interna (δ) da massa atomizada.

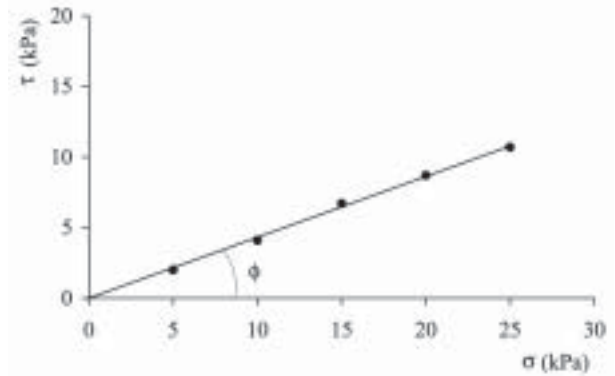


Figura 14. Ângulo de fricção silo-material (ϕ) para a massa atomizada e uma superfície metálica.

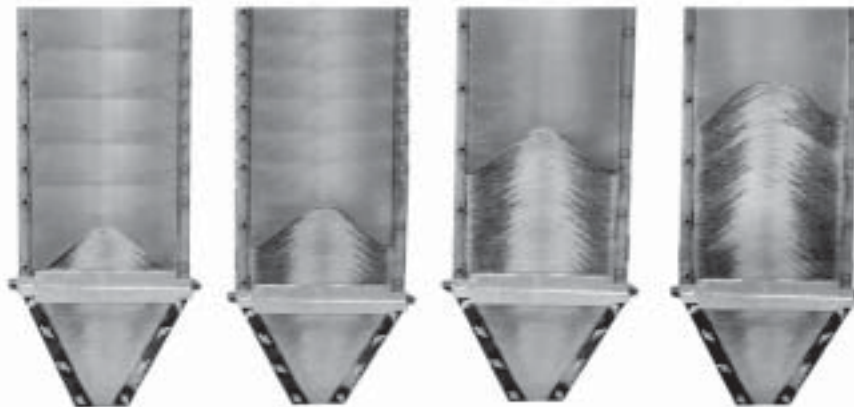


Figura 15. Seqüência de imagens do carregamento de um silo.

gando até os extremos do silo, concentrando-se junto às paredes do mesmo.

Durante a descarga do silo, uma maior ou menor homogeneidade do pó na saída pode depender do tipo de fluxo. Se o esvaziamento do silo se dá através do fluxo tubular, os primeiros aglomerados a serem descarregados dever ser os mais finos e os últimos os mais grossos, o que deve fazer com que a distribuição de tamanhos de grânulo do pó na saída varie com o tempo. Pelo contrário, se a descarga do silo acontece por fluxo mássico, o efeito de mistura produzido na boca de saída deve reduzir ou mesmo eliminar o efeito da segregação produzido durante o carregamento do silo na saída^{13,14,15,16}.

4.1.1 Determinação visual da segregação produzida durante o preenchimento de um silo

Para estudar a segregação que acontece durante o carregamento de silos com materiais granulares de fluidez elevada foi empregada uma mistura de 50% em peso dos esmaltes granulares de cor e tamanho diferentes e o silo semicilíndrico descritos anteriormente. Na Figura 15 são mostradas algumas das imagens mais representativas, filmadas com uma câmera de vídeo. Pode-se observar que mantendo fixo o ponto de carregamento, à medida que o

silo vai sendo preenchido vai se formando um montículo, no qual os grânulos mais finos (brancos) se acumulam no centro e os mais grossos (negros) são capazes de rolar sobre os outros, alcançando as paredes do silo e concentrando-se nesta região, tal qual fora previsto.

4.1.2 Influência do tipo de fluxo durante o descarregamento do silo sobre as características do pó na saída

Foi realizada uma série de ensaios de carregamento e descarregamento empregando o silo transparente anterior, a mistura de esmaltes antes citada e dois cones de descarga com ângulos de 16 e 25° para provocar os dois tipos de fluxo. Durante o descarregamento foram recolhidas amostras do material na boca de saída do silo e determinadas suas distribuições de tamanhos por peneiramento via seca.

Na Figura 16 está representada a evolução da porcentagem de aglomerados grossos na mistura resultante na boca de saída do silo em função do tempo, para os dois tipos de fluxo.

Verifica-se uma influência considerável do tipo de fluxo sobre a constância das características do pó durante a saída. De fato se confirma que, se durante o carregamento ocorreram segregações e a descarga do silo ocorre medi-

ante fluxo tubular, as características do pó na saída vão se modificando com o tempo. Por outro lado, se o fluxo é mássico, ainda que durante o carregamento tenha ocorrido o mesmo grau de segregação que no caso anterior, o material resultante durante a saída praticamente não se altera durante a descarga, devido ao efeito de mistura comentado anteriormente.

4.2 Desenhos de Silo para Armazenagem de Materiais Empregados na Indústria Cerâmica

4.2.1 Influência da natureza do pó sobre os parâmetros de desenho do silo

Neste item é aplicada a metodologia descrita anteriormente ao desenho de silos nos quais a descarga do material deve ser realizada via fluxo mássico, por diferentes razões. Em pós atomizados se verificam as duas condições para que ocorram segregações durante o carregamento do material nos silos: a distribuição de tamanhos dos grânulos é ampla (125-750 μm) e a fluidez do material é elevada. No caso concreto das massas atomizadas empregadas na fabricação de revestimentos, a segregação por tamanhos durante o preenchimento do silo, se o fluxo de descarga é tubular, terá como efeitos a variação da fluidez da massa e de seu teor de umidade durante o descarregamento. Inicialmente serão descarregadas as partículas mais finas, com menor fluidez e umidade, e posteriormente serão descarregados os grânulos mais grossos, com fluidez e umidade maiores. Na fabricação de grês porcelanato, além destes inconvenientes, a heterogeneidade durante a descarga provocará ainda variações de tonalidade no produto final.

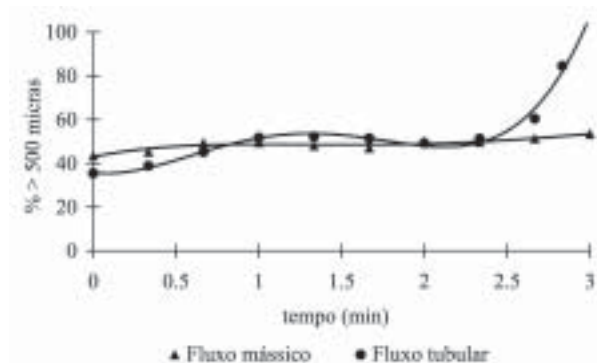


Figura 16. Influência do tipo de fluxo na homogeneidade do pó na saída do silo.

Tabela II. Parâmetros de desenho utilizados para os diferentes materiais.

| Material | Ângulo de fricção interna δ ($^{\circ}$) | Ângulo de fricção parede-pó ϕ ($^{\circ}$) | Densidade ρ (k/m^3) |
|-----------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Massa atomizada | 34 | 25 | 1050 |
| Quartzo | 40 | 23 | 950 |
| Óxido de zinco | 43 | 24 | 600 |

Para pós de média e baixa coesão, o problema é substancialmente diferente, uma vez que, devido à baixa fluidez destes materiais, não apresentam segregação. O principal problema que pode ocorrer está relacionado ao manejo destes materiais, com a interrupção do fluxo durante o descarregamento pela formação de grumos ou pelotas (Figura 1). Como exemplo destes materiais, foram escolhidos o óxido de zinco e o quartzo, com granulometrias similares às empregadas na fabricação de fritas e esmaltes.

Para todos os casos, os problemas descritos anteriormente são reduzidos ou eliminados se a descarga do silo se dá por fluxo mássico^{17,18,19}. O método utilizado para determinar o diâmetro mínimo da boca de saída (D) e o ângulo máximo formado entre a parede do silo na região de descarga e a vertical (θ) está esquematizado na figura 17.

Na Figura 18 estão representadas as funções de fluxo dos três materiais estudados e na Tabela II são apresentados os valores do ângulo de fricção interna do material (δ), do ângulo de fricção entre a parede do silo e o material (ϕ) e da densidade da massa (ρ), correspondentes a estes materiais.

Da análise destes resultados se deduz que existe uma relação direta entre o tamanho médio do pó (constituído por aglomerados e partículas) e a fluidez do material, refletida nas correspondentes funções de fluxo. O valor da ordenada na origem, denominado coesividade, e o da inclinação destas representações, parâmetros inversamente relacionados com a fluidez do pó, aumentam consideravelmente conforme o tamanho médio das partículas ou aglomerados é reduzido.

De maneira aproximada, o valor da coesividade da massa atomizada, a mais grossa, é de cerca de dez vezes



Figura 17. Diagrama de fluxo do método de desenho adotado.

menor que a do mais fino, o óxido de zinco, e cerca de quatro vezes menor que a do quartzo, que é de tamanho intermediário.

O ângulo de fricção interna (δ), Tabela II, que também está relacionado com a fluidez do pó, reflete esta mesma tendência, ainda que de forma menos acentuada. De fato, ainda que a variação do tamanho médio dos pós seja considerável, o valor do ângulo de fricção do pó se altera apenas em 9°.

Pelos resultados obtidos para o ângulo de fricção parede do silo-material (ϕ), a princípio pode-se dizer que, para os materiais estudados, este parâmetro depende praticamente apenas da natureza da superfície do silo.

A partir dos valores apresentados na Tabela II, e seguindo o método esquematizado na Figura 17, foram calculados o ângulo máximo formado entre a parede na zona de descarregamento e a vertical (θ) e o diâmetro mínimo da boca de descarga do silo (D), para que o fluxo durante a descarga destes materiais em um silo cilíndrico de paredes metálicas seja mássico. Na Tabela III são apresentados os valores de ambos parâmetros.

Nesta Tabela III pode-se apreciar que o valor do ângulo máximo, θ , para o qual o fluxo de descarregamento do silo é mássico, aumenta ligeiramente conforme aumenta a fluidez do pó ou seu tamanho, como era de se esperar. O diâmetro mínimo da boca de saída, D , para que não ocorram interrupções no fluxo devido a formação de grumos, aumenta consideravelmente com a diminuição da fluidez do pó ou seu tamanho. Este parâmetro é muito mais sensível às características do pó que o ângulo máximo na zona de descarga (θ). De fato, o valor do diâmetro máximo calculado para o óxido de zinco é cerca de 200 vezes maior que o do correspondente à massa atomizada, ainda que a diferença entre os ângulos máximos (θ) seja de apenas 3°.

O valor extremamente elevado obtido para o óxido de zinco (4.2 m) nos indica que é praticamente impossível dispor de um silo de paredes metálicas no qual o descarregamento deste pó se dê por fluxo mássico sem a formação

de grumos. Sendo assim, o descarregamento de silos que contenham materiais de alta coesão como o estudado necessitará de equipamentos auxiliares que facilitem o descarregamento, destruindo de maneira praticamente instantânea os grumos que forem se formando (vibradores, etc.).

4.2.2. Efeito da natureza da parede interna do silo sobre os parâmetros de desenho

Para determinar o efeito da natureza da superfície interna do silo sobre o ângulo máximo da parede do cone (θ) e sobre o diâmetro mínimo da boca de saída (D), foi realizada uma série de experimentos com o sistema teflon-massa atomizada para determinar o ângulo de fricção entre ambos materiais. Seguindo o mesmo procedimento do item anterior (Figura 17), foram determinados os parâmetros de desenho para um silo com a parede interna revestida de teflon. Na Tabela IV são apresentados os resultados obtidos.

Confirmou-se que, para a massa atomizada estudada, o ângulo máximo da parede na zona de descarga do silo (θ) aumenta consideravelmente com a redução da fricção entre o pó e a superfície da parede (ϕ), o que aumenta a capacidade do silo sem que se altere sua altura (Figura 19).

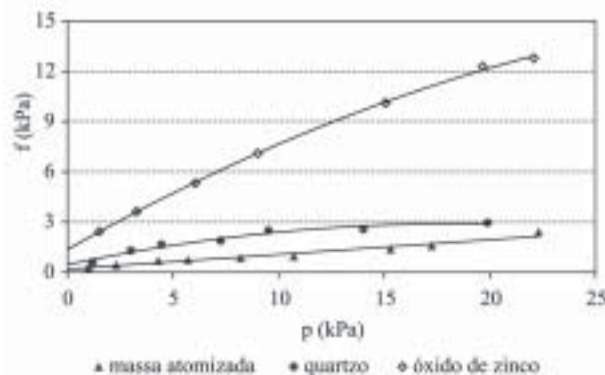


Figura 18. Funções de fluxo dos materiais estudados.

Tabela III. Parâmetros de desenho dos silos calculados para os diferentes materiais.

| Material | Ângulo máximo da parede, θ (°) | Diâmetro mínimo da zona de descarga, D (m) |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| Massa atomizada | 23 | \cong 0.02 |
| Quartzo | 21 | 0.45 |
| Óxido de zinco | 20 | 4.20 |

Tabela IV. Parâmetros de desenho utilizados para os diferentes materiais.

| Parâmetros de desenho | Material da superfície interna da parede | |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|
| | Teflon | Metal |
| Ângulo de fricção parede-pó, ϕ , (°) | 15 | 25 |
| Ângulo máximo da parede, θ , (°) | 35 | 23 |
| Diâmetro mínimo da boca de saída, D , (m) | \cong 0.02 | \cong 0.02 |

4.3. Comprovação da Validade da Metodologia Aplicada para o Desenho de Silos

Tendo em vista os valores de diâmetro mínimo da boca de saída obtidos para os diferentes materiais (Tabela III), foi realizada uma série de experimentos com massa atomizada, em escala piloto, para comprovar a validade

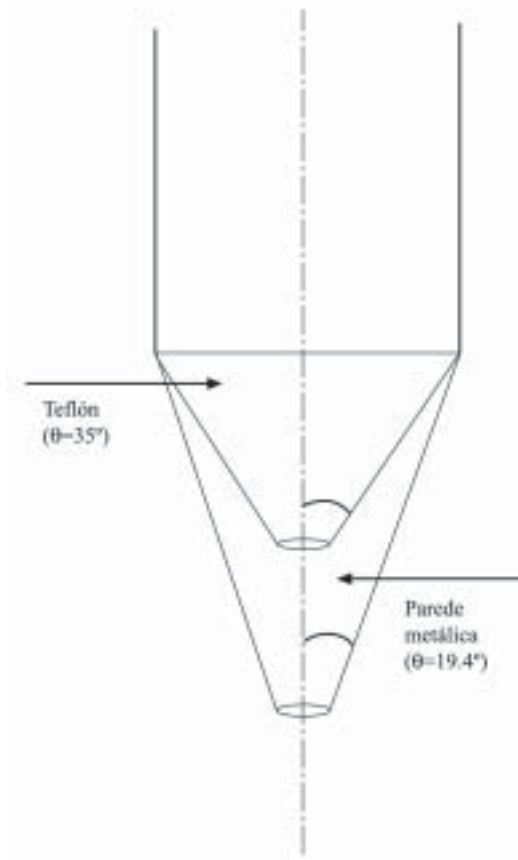


Figura 19. Efeito da natureza da superfície sobre o ângulo máximo que a parede deve ter.

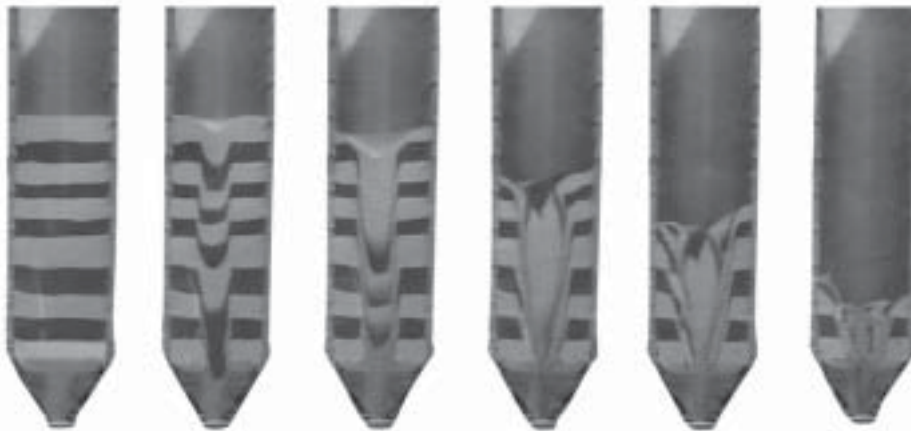


Figura 20. Sequência de imagens da descarga do silo com fluxo tubular.

do método de desenho apresentado.

Foram construídos dois cones intercambiáveis, com ângulos de descarregamento de 18 e 26° cada um, abaixo e acima do ângulo de projeto, para serem acoplados ao silo semicircular descrito anteriormente. Para visualizar o tipo de fluxo de material durante o descarregamento o silo foi preenchido alternadamente com massa atomizada de cor vermelha e branca, formando extratos diferentes de cor. O descarregamento do silo com os dois ângulos de cone foi filmado com uma câmera de vídeo. Nas Figuras 20 e 21 são apresentadas algumas das imagens mais representativas.

Verifica-se que empregando um ângulo de cone ligeiramente maior que o calculado, o fluxo do pó durante o descarregamento é tubular (Figura 20), enquanto que utilizando um cone de ângulo menor que o teórico o fluxo é claramente mássico (Figura 21). Ambos resultados confirmam a validade do método de desenho utilizado.

5. Conclusões

Do estudo apresentado podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- Se durante o carregamento de um silo é mantido constante o ponto de carga, situação bastante habitual, ocorre a segregação do sólido, devidos às diferentes trajetórias que as partículas seguem em função de seus tamanhos. Este problema se acentua com o aumento da fluidez do material e com a diferença de tamanho entre partículas que o formam.
- A variação nas características do pó na saída do silo, devida às segregações produzidas durante o carregamento, é reduzida ou eliminada se durante o descarregamento o fluxo do pó se dá na forma mássica, o que depende do ângulo da zona de descarregamento. Para o caso da massa atomizada empregada neste trabalho, este ângulo foi, para um silo cilíndrico e metálico, de 23°.

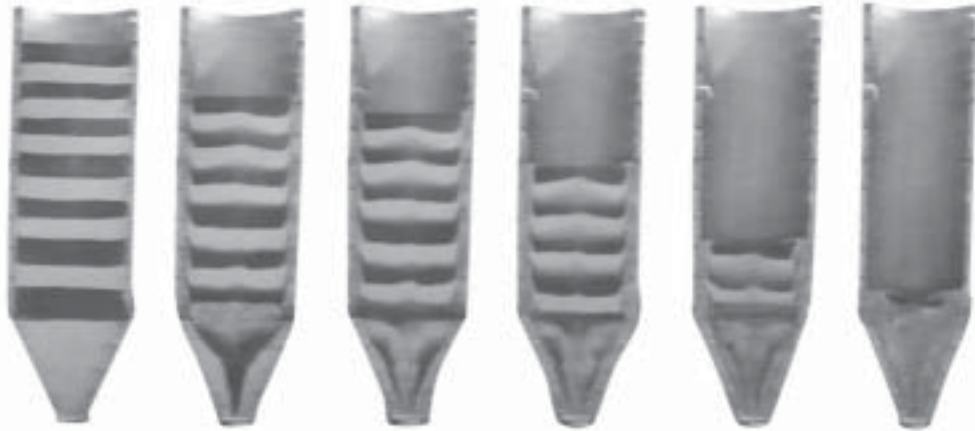


Figura 21. Sequência de imagens da descarga do silo com fluxo mássico.

- O descarregamento contínuo de um material coeso pode ser obtido quando se desenha um silo para o qual o fluxo de descarregamento seja mássico e o diâmetro do orifício de vazão seja adequado. Ambos parâmetros podem ser obtidos a partir do conhecimento do comportamento reológico do material e da aplicação da metodologia de desenho de silos.
- As propriedades superficiais da parede interna do silo exercem influência sobre o diâmetro do orifício de saída e sobre o ângulo de fluxo mássico. Ao se aumentar o ângulo de fricção entre o material a ser armazenado no silo e a parede interna deste, aumenta-se o diâmetro mínimo necessário para que não se formem grumos e diminui o ângulo máximo para que ocorra o fluxo mássico.

Referências Bibliográficas

1. Jenike, A.W. Gravity flow of solids. Bulletin of the University of Utah. N. 123, 1961.
2. Jenike, A.W. Storage and flow of solids. Bulletin of the University of Utah. N. 53(26), 1964.
3. Jenike, A.W. Review of the principles of flow of bulk solids. CIM Trans., 73, 141-146, 1970.
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. Process., 1(1), 73-81, 1989.
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.
9. Feodosiev, V.I. Resistencia de materials. 2a. ed. Moscou: 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.; Principles of powder mechanics. Pergamon Press, 1970.
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 Maio/92.
16. Claugue, K.; Wright, H. Minimizing segregations in bunkers. ASME Paper n. 72-MH-16. Second Symposium on storage and flow of solids, Chicago. Setembro/1972.
17. Marinelli, J.; Carson, J.W. Solve solids flow problems in bins, hoppers and feeders. Chem. Eng. Prog., 88(5), 22-28, 1992.
18. Purityan, H.; Pittenger, B.; Carson, J.W.; Solve solids handling problems by retrofitting. Chem. Eng. Prog., 94(4), 27-39, 1998.
19. Schule, D.; Schwedes, J. Storage and flow of bulk solids in silos and information for planning new installations. VGB Kraftwerkstechnik, 70(9), 665-669, 1990.