

TECNOLOGIA DE PÓS

0. INTRODUÇÃO

Apesar de a Humanidade ter lidado com pós desde os seus primórdios, só na segunda metade do Século XX estes foram estudados cientificamente. Nasceu assim um novo ramo do conhecimento que se denomina Tecnologia dos Pós, e que se propõe caracterizá-los e estudar as operações unitárias que lhes dizem respeito.

A primeira dificuldade que surge, e a que normalmente se procura fugir, é a de definir o que é um pó.

De facto, se procurarmos exemplos extremos, poderemos interrogar-nos sobre se um líquido não será um pó em que as partículas se reduzam às moléculas, ou se um cemitério de automóveis não é um monte de pó, em que as carcassas dos carros seriam as partículas.

O senso comum transmite-nos uma imagem de um pó que de nenhuma forma se coaduna com estes exemplos extremos, sem que, no entanto, seja fácil definir os limites.

Assim definiremos pó como **um conjunto de partículas sólidas, fisicamente distintas, que se comportam em conjunto.**

As partículas de um pó estão sujeitas a dois tipos distintos de forças que sobre elas actuam:

1- Forças Internas

Estas forças tendem a cancelar-se mutuamente, dado que **as suas orientações se distribuem ao acaso.** Microscopicamente elas tendem a restringir a liberdade de movimento independente das partículas, o que se manifesta macroscopicamente por um efeito de coesão que o pó exhibe. São exemplos as forças de Van der Waals, interacções electrostática ou magnética, pontes líquidas, etc.

2- Forças Externas

Estas forças **não são orientadas ao acaso**, e tendem, por isso, a causar movimento de zonas do pó. São exemplos destas forças a gravidade ou o impacto da pá de um agitador.

É costume dividir os pós em dois grandes grupos: **pós coesivos** e **pós soltos** (“free-flowing”).

Mais uma vez o senso comum nos transmite uma imagem que não é fácil transpor para termos precisos. Com efeito, qualquer pessoa se apercebe da diferença de comportamento que existe entre a farinha e a areia.

No caso da farinha (pó coesivo) o escoamento do pó dá-se em “avalanches”, isto é, o pó parece fracturar-se e não escoar-se, enquanto que, no caso da areia (pó solto), o escoamento é suave e progressivo.

Porquê esta diferença de comportamento?

A primeira diferença que salta à vista é a diferença de tamanho das partículas nos dois casos, mas a pergunta pode transpor-se interrogando-nos sobre se tal diferença é significativa ou mera coincidência.

O facto de pó coesivo parecer fracturar mais do que escoar-se sugere que as forças internas neste pó têm uma intensidade muito grande comparada com o peso das partículas, sendo por isso necessário para as vencer, não o peso de uma, mas o de muitas partículas, que assim se movem em bloco.

Com efeito todas as forças internas são consequência de interacção entre as superfícies de partículas vizinhas, e como tal tendem a variar com o quadrado da dimensão da partícula, enquanto que o peso das partículas varia com o cubo da sua dimensão.

Assim, para os pós grosseiros, o peso das partículas é grande quando comparado com as forças internas, enquanto que para os pós finos tenderá a verificar-se o contrário.

Do exposto se conclui que deverá haver uma dimensão crítica, abaixo da qual as forças internas predominam sobre as externas. Quando tal sucede o pó diz-se **coesivo**; quando as forças externas predominam sobre as internas o pó diz-se **solto** (“free-flowing”).

Infelizmente, na prática as coisas não são tão simples, pois a dimensão das partículas não é o único factor que afecta o comportamento do pó. A densidade do material de que as partículas são constituídas afecta igualmente a sua massa, e por isso o seu peso, sendo por isso de prever, como a experiência confirma, que a dimensão de transição seja menor num pó de um material mais denso.

Apenas como curiosidade é de notar que um pó que é solto na Terra pode ser coesivo na Lua, já que a aceleração da gravidade, e por isso o peso das partículas, é cerca de seis vezes menor!

Outros factores, tais como a forma e a rugosidade das partículas, e a própria natureza do material têm também influência, já que afectam a área de contacto entre as partículas, e conseqüentemente a intensidade das interacções entre elas.

Note-se, aliás que a proporcionalidade das forças internas ao quadrado da dimensão das partículas e do peso ao cubo dessa dimensão, só tem um significado preciso quando se consideram partículas regulares (p. e. esféricas) , o que, na prática, não será geralmente o caso.

Por outro lado é preciso ter em conta que, para os pós cujas partículas tenham dimensões próximas da dimensão crítica, a transição de pó solto a coesivo é gradual, já que interacções da ordem de metade do peso da partícula já restringem apreciavelmente a sua liberdade de movimento, enquanto que interacções da ordem do dobro ou do triplo do peso de uma partícula podem ser vencidos com agregados de apenas algumas partículas, os quais não dariam de forma alguma origem a um efeito macroscópico semelhante ao de um pó coesivo típico.

Teremos ocasião de voltar a este assunto a propósito dos fenómenos de segregação e mistura de pós.

Desde já, no entanto, ressalta a importância que a caracterização de um pó assume no seu estudo e na previsão do seu comportamento.

1. CARACTERIZAÇÃO DE PÓS

Sendo um pó um conjunto de partículas sólidas, a primeira característica que se nos apresenta como relevante definir é a dimensão das partículas. No caso geral elas não serão todas iguais e terão forma irregular, pelo que convém começar por definir o que é a dimensão de uma partícula.

No caso de uma partícula com forma regular (esfera, cubo, octaedro, tetraedro, etc.) haverá uma dimensão característica em termos da qual a partícula fica totalmente definida. Porém, na generalidade dos casos, as partículas não terão forma regular, e, por isso, torna-se necessário atribuir-lhe uma dimensão média, por exemplo o diâmetro da esfera com o mesmo volume do que a partícula, o diâmetro da esfera com a mesma área superficial do que a partícula, etc.

Sucedem, porém, que as várias definições não são equivalentes, já que um cubo de aresta unitária tem o volume igual a uma esfera de diâmetro 1.24, enquanto que a sua área superficial é igual à de uma esfera de diâmetro 1.38.

Assim, a dimensão de uma partícula torna-se função do método de medida usado, já que os diferentes métodos utilizam diferentes princípios físicos.

De um modo geral, todos eles avaliam a dimensão da partícula pela dimensão da esfera do mesmo material que, nas mesmas circunstâncias, causasse o mesmo efeito.

Os mais usados são os seguintes:

Diâmetro volumétrico - Diâmetro da esfera com o mesmo volume do que a partícula

Diâmetro superficial - Diâmetro da esfera com a mesma área superficial do que a partícula

Diâmetro aerodinâmico - Diâmetro da esfera do mesmo material que opõe a mesma resistência ao fluxo de um fluido do que a partícula, nas mesmas condições de fluxo

Diâmetro de Stokes - Diâmetro da esfera do mesmo material que, em queda livre no mesmo meio e em regime laminar, atinge a mesma velocidade terminal do que a partícula

Diâmetro projectado - Diâmetro da esfera que projecta uma imagem com a mesma área do que a partícula assente na sua posição mais estável

Diâmetro de peneiração - Diâmetro da maior esfera que passa pela menor abertura quadrada através da qual passa a partícula

Para outras definições ver “Particle size measurement”, T. ALLEN .

Em virtude da forma como são obtidos, alguns dos diâmetros acima definidos fornecem um valor médio da dimensão das partículas da amostra ensaiada, enquanto que outros são adequados para fornecer informações sobre o espectro granulométrico do pó.

A definição da forma das partículas é bastante mais complexa, e, de um modo geral, muito menos estudada. Heywood reconheceu que o termo “forma”, tal como em geral é usado, se refere a duas características distintas da partícula. Tais características devem ser apreciadas separadamente, sendo uma o grau com que a partícula se aproxima de uma forma definida, tal como um cubo, tetraedro ou esfera, e a segunda as proporções relativas que permitem distinguir um cubóide, tetraedróide ou esferóide de outro da mesma classe.

Na maioria das aplicações, a forma é, no entanto, uma característica de menor interesse, pelo que não levaremos o assunto mais longe. Para mais detalhes, consultar “Particle size measurement”, T. ALLEN, cap. 4 .

A ocorrência de pós em que as partículas são todas iguais é, no entanto, rara, pelo que a dimensão média das partículas não define univocamente o pó.

Em termos estatísticos o diâmetro médio é uma **medida de localização**, a qual deve ser complementada por uma **medida de dispersão**.

A forma mais corrente de representar a distribuição granulométrica de um pó são as curvas diferenciais ou cumulativas de frequência.

Estas curvas são construídas a partir dos dados da análise granulométrica, por exemplo por peneiração, dividindo a gama das dimensões das partículas em classes, representando em abcissa a dimensão média de cada classe e em ordenada a quantidade correspondente determinada por análise, em geral (mas nem sempre) sob a forma de percentagem da massa da amostra, enquanto que na curva cumulativa se representa em ordenada a quantidade de pó com dimensão inferior (ou superior) à da classe (curvas cumulativas inferiores ou superiores).

A curva cumulativa é portanto a curva integral da curva diferencial, e inversamente esta é pode ser obtida por derivação da curva cumulativa.

Quando, a partir destas curvas se pretende obter um valor médio é necessário usar médias ponderadas. Para fazer isto é preciso ter em conta o princípio físico usado nas determinações, já que as curvas obtidas em termos de número de partículas ou de massa das mesmas **não são iguais**.

Embora a curva diferencial seja a mais elucidativa, é frequente apresentarem-se os resultados em forma cumulativa, já que, na prática, o que muitas vezes se deseja é classificar as partículas em **grossos e finos**, conforme a sua dimensão é superior ou inferior a uma fronteira arbitrariamente escolhida.

As distribuições são a normal, log-normal e Rosin-Ramler. Para mais detalhes sobre distribuições granulométricas, consultar a obra já citada "Particle Size Measurement", T. ALLEN.

Outra característica muito importante de um pó é a sua **porosidade**, ou seja a fracção do volume do pó que não é ocupado por partículas. No caso de um pó constituído por esferas todas iguais é possível imaginar quatro tipos de arranjos regulares cuja porosidade oscila entre os 25% e os 50%. Na prática, porém, e mesmo para o caso ideal de partículas todas iguais, não é correcto admitir arranjos ordenados, embora para pós soltos de esferas se encontrem em geral porosidades da ordem dos 40%. Geometricamente a porosidade é independente da dimensão das partículas e depende apenas da forma como estas se dispõem no espaço. No entanto, já vimos que, abaixo de uma certa dimensão, as partículas tendem a mover-se em conjunto, já que as forças internas se tornam comparáveis às externas. Isto significa, em termos simples, que tudo se passa como se a unidade independente deixasse de ser a partícula e passasse a ser o agregado de partículas, os quais deixam entre si espaços livres da ordem da porosidade dos pós soltos; mas como não são, por sua vez, totalmente compactos, o volume realmente ocupado pelo sólido é menor, e a porosidade tende a aumentar.

Exemplificando, suponhamos que os agregados têm uma porosidade interna de 0.3 , e se dispõem no espaço deixando entre si uma porosidade de 0.4 . A porosidade total será portanto

$$\varepsilon = 0.4 + (1 - 0.4) \times 0.3 = 0.58$$

Para muitos pós finos é concebível que a agregação se processe através de várias etapas deste género, originando pós com porosidades que chegam a alcançar os 90%.

Por outro lado, isto significa que, para os pós soltos, a porosidade é uma característica muito mais importante do que para os pós coesivos, já que nestes é fácil de compreender que a porosidade varia grandemente com as pressões a que o pó está sujeito. Com efeito, é muito fácil aplicar a um pó forças de compressão muito superiores ao peso das partículas, e, conseqüentemente, quebrar as ligações originadas pelas forças internas que, embora grandes comparadas com o peso das partículas, são pequenas quando comparadas com as forças aplicadas a um pó, por exemplo, por um punção. Já no caso dos pós soltos o arranjo das partículas se processa sem a interferência das forças internas, as quais são, neste caso, desprezáveis, e assim apenas se processa uma limitada dose de rearranjo das partículas antes de a força compressiva ser equilibrada pela resistência à compressão do próprio material de que as partículas são constituídas.

No caso dos pós soltos a irregularidade da forma das partículas normalmente conduz a um aumento da porosidade, já que, tendo as partículas superfícies irregulares, o atrito se opõe ao seu movimento relativo, e, por conseguinte, dificulta a ocorrência de estruturas compactas.

As partículas tendem a “enclavar-se” umas às outras, e, portanto, a dispor-se num arranjo mais aberto, ou seja, de maior porosidade.

Como já se viu, no caso dos pós coesivos, todas estas características são de somenos importância, já que as partículas se não movem individualmente mas em grupos, os quais em grande parte mascaram as suas características, tornando-se outrossim dependentes do estado de compactação do pó.

Em geral os pós não são constituídos por partículas todas iguais, mas antes cobrem um espectro granulométrico mais ou menos vasto. A dispersão do espectro é, sobretudo para os pós soltos, uma característica muito importante, pois a existência de partículas pequenas que possam ocupar os vazios entre as maiores sem aumento sensível do volume total do pó conduz necessariamente à redução da porosidade.

A porosidade é, em geral, avaliada através da densidade a granel do pó. Aqui, a dificuldade consiste em definir o estado de compactação do material, o que, em geral, é feito mais ou menos empiricamente.

2. MÉTODOS DE MEDIDA

A característica mais frequentemente usada em análise para definir um pó é a granulometria, quer através de um simples valor médio, quer através da obtenção do espectro granulométrico.

Vamos percorrer sumariamente os principais métodos.

Microscopia

A amostra de pó a analisar é adicionada a um líquido, formando uma suspensão diluída que se agita fortemente a fim de dispersar homogeneamente o pó no seio do líquido. Retira-se em seguida uma ou duas gotas que se depõem numa lâmina de vidro, a qual é em seguida observada ao microscópio (para detalhes sobre técnicas de preparação ver “Particle Size Measurement”, T. ALLEN). Dada a dificuldade de se conseguir suspensões homogéneas de pós grosseiros, o diâmetro máximo é limitado, dependendo da densidade, a cerca de 100 μm .

A medição do tamanho da partícula é feita por comparação com escalas calibradas gravadas na ocular do microscópio. O tipo de diâmetro mais frequentemente determinado por este método é o da esfera de área projectada igual à da partícula (que se assume assente na sua posição mais estável). Para este fim, a imagem da partícula é sucessivamente comparada com círculos normalizados gravados na ocular, e classificada. Outro método consiste em escolher o menor de uma série de rectângulos padrão que circunscreve completamente a partícula.

Um tipo de ocular que permite uma leitura muito rigorosa subdivide a imagem em duas de cores diferentes (normalmente azul e vermelho), as quais podem ser deslocadas através de um tambor graduado. Calibrando previamente a ocular com uma escala micrométrica colocada na platina do microscópio, conseguem-se leituras com erros da ordem de 0.1 μm .

Os resultados das observações ao microscópio, as quais devem incidir sobre um mínimo de 300 partículas, são em seguida usadas para construir o espectro granulométrico do pó.

Apesar de ser o método mais absoluto, a microscopia é raramente usada, por ser muito morosa, usando-se em geral apenas para calibrar outros métodos.

Contador Coulter

Uma suspensão diluída do pó num electrólito é obrigada a passar através de um orifício de dimensão comparável à das partículas a medir. De ambos os lados do orifício, existem eléctrodos mergulhados no electrólito. A passagem de uma partícula pelo orifício reduz a secção eficaz do electrólito e aumenta portanto a sua resistência eléctrica, gerando um impulso, que é posteriormente amplificado, tanto maior quanto maior for a fracção da secção do orifício ocupado pela partícula. Da análise dos impulsos gerados deriva-se a distribuição granulométrica do pó.

Esta técnica é muito útil para análise de pós finos, especialmente quando têm um espectro granulométrico apertado. Originariamente este aparelho foi concebido para contagem de glóbulos em amostras de sangue, tendo no entanto sido adaptado para outras aplicações.

Vários tipos de erros podem ocorrer, quer por coincidência de mais do que uma partícula na zona de medida, quer por desigual oportunidade de apresentação ao orifício dos vários tipos de partículas da suspensão.

Peneiração

Para pós com partículas maiores do que $40\mu\text{m}$ a peneiração é o método mais usado. De notar que nalguns sectores se usa o termo “tamis”, recolhido do francês para peneiro, usando-se o termo peneiro apenas para as malhas grosseiras.

Consiste em colocar a amostra sobre uma série de pratos cujos fundos são em rede calibrada, dispostos com as redes de abertura maior no topo e progressivamente menores em baixo, e, após agitação do conjunto, recolher as fracções compreendidas entre redes sucessivas. A cada fracção é atribuída a dimensão média entre a abertura das redes entre as quais é recolhida. Alternativamente a fracção pode ser designada por -A +B, sendo B a designação do peneiro em que ficou retida e A a do peneiro mais fino através do qual passou.

A designação dos peneiros pode ser feita pela indicação da dimensão da abertura nominal, ou através do número de malha. Este corresponde, na maior parte dos casos, ao número de malhas por polegada linear da rede, medida na direcção de um dos fios da malha (normalmente quadrada). Embora esta designação seja ambígua, já que peneiros com o mesmo número de malha (“mesh number”) podem ter aberturas diferentes em virtude do uso de fios de diferente espessura, é muito frequentemente usado. Para eliminar a ambiguidade dever-se-á indicar sempre a série a que se refere (B.S., ASTM, DIN, Tyler, AFNOR, etc).

Ao usar peneiros é bom ter em mente que, de facto, as aberturas não são nunca todas iguais, e esta desigualdade tende acentuar-se com o uso, pelo que os peneiros devem ser periodicamente calibrados.

A título de exemplo, a norma British Standard (BS) nº 410 (1961) exige que a abertura média da malha de um peneiro de 200 mesh, cujo valor nominal é de $75\mu\text{m}$, não se desvie deste valor mais do que $4.6\mu\text{m}$, tolerando até 6% das aberturas com um desvio da média até $19\mu\text{m}$, e não tolerando a existência de aberturas com um desvio da média igual ou superior a $33\mu\text{m}$.

Um dos problemas postos pela peneiração consiste na determinação do seu ponto final, o qual, idealmente, seria quando a massa das várias fracções não sofresse nenhuma alteração. No entanto este ponto final não é realista, não só em virtude da dispersão tolerada na abertura da malha, mas também pelo tempo que demoraria a atingir, e pelo facto de um prolongamento indefinido da operação poder causar fractura de algumas das partículas do pó, enriquecendo a mistura em finos e falseando assim o resultado.

Um critério para a determinação do ponto final é o de terminar a operação quando **em todos os peneiros** o material que passa em 5 minutos de operação do peneiro for inferior a 0.2% do material retido nesse peneiro.

Assim a operação deverá ser conduzida por períodos sucessivos de 5 minutos, no fim dos quais as fracções são recolhidas e pesadas e os peneiros limpos e recarregados. A não descolmatação dos peneiros no final de cada período torna o ponto final anteriormente definido destituído de sentido, já que a progressiva colmatação dos peneiros reduz a área de passagem oferecida ao pó, e conseqüentemente reduz a taxa de passagem do pó, sem que isso signifique progresso da operação. A massa de amostra a usar deverá ser de 50 a 100g, sem o que a operação se poderá prolongar excessivamente.

A agitação da bateria de peneiros pode ser feita manualmente, ou, mais frequentemente, por dispositivos mecânicos ou eléctricos de vibração. As séries de peneiros mais usadas têm aberturas entre $38\mu\text{m}$ e $3500\mu\text{m}$, em progressão geométrica de razão $^4\sqrt{2}$. Para materiais mais grosseiros usam-se, em geral, crivos em chapa com aberturas circulares ou quadradas, enquanto que, para materiais mais finos se podem usar peneiros especiais cujas aberturas são geradas em finas chapas de níquel por corrosão electroquímica controlada, podendo ir até $5\text{-}10\mu\text{m}$.

Sedimentação

Este método assenta no facto de partículas maiores (ou mais densas) sedimentarem mais depressa do que as menores (ou menos densas), gerando-se na suspensão do pó um gradiente de concentrações, o qual pode ser apreciado tomando amostras de volumes iguais da suspensão a um dado nível, filtrando e pesando as várias fracções (Pipeta de Andreason).

Um outro método consiste na utilização de uma balança cujo prato está imerso na suspensão, através da qual se mede a quantidade de pó depositado no prato ao longo do tempo (balança de sedimentação).

Outro método de quantificar o gradiente de concentrações consiste em medir a transmitância da luz através da suspensão a um dado nível ao longo do tempo, ou a vários níveis num dado instante. Este método óptico é limitado, para partículas muito finas, pelo facto de que, quando o comprimento de onda da luz se aproxima da dimensão das partículas, a ele se sobrepõe outro fenómeno, que consiste em a suspensão se comportar como uma rede de difracção.

Este facto deu origem a dois tipos de solução:

- i) a substituição da luz visível por luz de muito menor comprimento de onda, por utilização de raios X, e,
- ii) a medição angular da luz difractada, a vários ângulos diferentes

Esta última solução gerou os modernos aparelhos de medição de granulometria por **Difracção Laser**, os quais operam sobre um fluxo de suspensão numa célula de quartzo, tornando a análise muito mais rápida por deixar de ser necessário esperar o progresso da sedimentação, e dando valores mais representativos, visto que, enquanto que, no regime viscoso em que a sedimentação se processa, a partícula opõe a sua maior secção à direcção do fluxo (normalmente vertical), em regime turbulento (como ocorre na recirculação forçada nos difractómetros laser) a orientação é aleatória.

Deste modo é de esperar que os métodos de sedimentação tendam a dar um valor pecando por defeito, enquanto que os difractómetros laser dão um valor muito mais real.

Outra evolução de algumas famílias de aparelhos consiste na substituição da força da gravidade por um campo centrífugo, o que acelera muito o processo. Nesses casos a apreciação do progresso da sedimentação é normalmente feita por métodos ópticos.

Área Específica

Deleted: **Sedimentação**

Formatted: Font: Arial

Formatted: Font: Arial

Este tipo de determinação é bastante útil em aplicações em que o uso do pó está associado a fenómenos de superfície, como seja em catalisadores e em pigmentos.

O método mais vulgar é o de BET, medindo-se a adsorção de azoto na amostra à temperatura do azoto líquido.

O aparelho consiste em dois balões iguais, um contendo a amostra previamente desgaseificada e o outro vazio, os quais são cheios de azoto e levados à temperatura do azoto líquido. No balão que contém a amostra o azoto é adsorvido nesta, e a pressão diminui. A diferença de pressão entre os dois balões é uma medida da área específica do pó, no qual é convertida através de uma fórmula fornecida pelo construtor do aparelho.

A dimensão média das partículas é avaliada supondo que estas são todas esféricas, maciças e iguais. Se for γ a densidade do material das partículas, d o seu diâmetro e a a sua área específica (área de superfície por unidade de massa), teremos

$$a = \frac{\pi d^2}{\pi/6 d^3 \times \gamma} = \frac{6}{d \times \gamma}$$

donde o diâmetro médio será

$$d = \frac{6}{\gamma \times a}$$

Se γ for expresso em g/cm^3 e a em m^2/g , então d virá em μm .

Permeabilidade

A resistência oposta à passagem de um fluido por um leito de partículas é uma medida da área interna do leito, já que essa resistência é causada pelo atrito do fluido na superfície das partículas do leito, e pode ser medida através da perda de pressão no fluido ao atravessar o leito.

Por outro lado, e como já vimos, a área específica de um pó está relacionada com o diâmetro das partículas, supostas iguais, maciças e esféricas. Um dos dispositivos usuais para a determinação do diâmetro médio por este método é o Fischer Sub Sieve Sizer. Este aparelho, embora não conduza a valores muito correctos nas gamas mais baixas de granulometria, é, no entanto de uso muito fácil, e os valores que dá são habitualmente reprodutíveis. Por isso encontra muitas aplicações em controlo de qualidade.

Sobre outros métodos de análise de pós, e para mais detalhes sobre os métodos referidos, bem como indicações sobre nomes e moradas das firmas construtoras e representantes em Inglaterra, consultar a obra já citada "Particle Size Measurement", T. ALLEN.

3. AMOSTRAGEM

Qualquer que seja o método de análise escolhido, os resultados só serão fidedignos se a amostra representar, de facto, o material que se pretende caracterizar.

No caso de um pó constituído por partículas todas iguais, é evidente que qualquer grupo de partículas, ou até uma só partícula, é suficiente para o caracterizar. Como, porém, na prática, se nos deparam quase invariavelmente pós cujas partículas são desiguais, é necessário muito cuidado com a forma como se selecciona a amostra para que ela seja representativa. Para tal **devem seguir-se sempre as duas regras** seguintes:

- 1- Um pó deve ser sempre amostrado em movimento**
- 2- Devem recolher-se numerosas pequenas porções de toda a torrente do pó, em vez de se recolher continuamente uma pequena parte da torrente**

Uma vez colhida a amostra global, esta é geralmente demasiado grande para ser usada inteira no método de análise seleccionado, e terá de ser subdividida até um tamanho conveniente.

O melhor dispositivo para proceder a esta divisão consiste numa mesa rotativa com um certo número de cavidades (em geral 16), para as quais descarrega um alimentador que recebe a amostra a dividir de uma tremonha (Na prática, a mesa é um prato, com orifícios onde encaixam tubos de vidro onde o material é recolhido). Desde que o número de voltas que a mesa dá durante a descarga da tremonha seja superior a 50, a flutuação de composição entre as várias fracções recolhidas será muito pequena. Se, porém, a divisão da amostra se processar em menos do que 50 voltas da mesa, é aconselhável remisturar as várias fracções e recomeçar regulando o alimentador para um débito menor. Como a mesa é girada por um motor de velocidade constante, basta cronometrar uma vez as 50 voltas, passando a usar no futuro o tempo de descarga como parâmetro.

Se as fracções recolhidas forem demasiado pequenas, poderão ser associadas, desde que em número inteiro de fracções. Se forem demasiado grandes, o processo pode ser repetido com uma ou mais fracções (sempre em número inteiro).

As precauções necessárias em todo o processo de amostragem e divisão da amostra andam a par com a tendência dos constituintes do pó para segregarem, devendo por isso tomar-se especial cuidado com os pós soltos.

4. MISTURAS. GRAU DE MISTURA

Quando um pó é constituído por partículas que não são todas idênticas, ele diz-se uma mistura. Note-se que neste sentido **todos os pós com espectro granulométrico de extensão finita devem ser considerados como misturas**, não se devendo definir a identidade apenas pela composição química do material de que as partículas são constituídas. Pelo contrário, sob o ponto de vista da Tecnologia dos Pós, é frequentemente mais importante a diferença de tamanho de grão dos componentes do que a sua natureza química.

Ao falar-se de mistura, surge imediatamente a necessidade de distinguir uma “boa” de uma “má” mistura.

Para atacar este problema vamos mais uma vez considerar situações extremas. Assim diremos que **uma mistura é perfeita se qualquer amostra, de qualquer tamanho, que se retire da mistura tiver sempre exactamente a mesma composição**. Infelizmente tais misturas não existem, só sendo mesmo teoricamente possíveis com meios contínuos, já que se reduzirmos sucessivamente o tamanho da amostra retirada de um meio descontínuo (como é um pó) chegaremos inevitavelmente a um ponto em que a amostra conterà uma só partícula. Acresce que amostras menores do que a menor partícula na mistura não são mesmo possíveis, e portanto o tamanho da amostra também tem um limite inferior.

O exemplo clássico do arranjo ordenado que mais se aproxima da mistura perfeita para uma mistura de dois componentes em proporções iguais é ilustrado pelo tabuleiro de xadrez (a duas dimensões) ou a estrutura de um cristal de cloreto de sódio (a três dimensões).

Na prática arranjos destes tipos são de ocorrência extremamente improvável, embora certos de arranjos ordenados possam, em certos casos, ter interesse, como veremos adiante.

No polo oposto da escala, teremos a situação em que os dois constituintes, embora coexistindo no mesmo recipiente, se encontram totalmente separados um do outro. (Mistura segregada)

Mas ainda aqui nem sempre é fácil definir separação. Nos casos A, B e C ilustrados na Fig 1, cada um dos dois constituintes ocupa metade do volume do mesmo recipiente, e não há interpenetração dos dois constituintes. No entanto, a área de contacto entre eles claramente aumenta da situação A para a situação C, pelo que podemos dizer que no caso C eles estão mais misturados do que no caso B, e neste mais do que no caso A, se usarmos para definir o grau de mistura a área da interface entre os dois

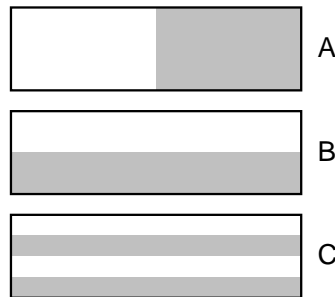


Figura 1

constituintes por unidade de volume (como aliás foi usado no passado em estudos teóricos). Tal critério, embora elucidativo neste caso, é em geral de pouca utilidade, em virtude das dificuldades de medição que comporta.

Aquilo que, na prática, se procura obter é uma **mistura aleatória**, ou seja, **uma mistura em que a probabilidade de encontrar uma partícula de um constituinte é a mesma em todos os pontos da mistura, e igual à proporção em que o constituinte entra na mistura**. Amostras retiradas de uma tal mistura não terão exactamente a mesma composição, embora as flutuações sejam em geral pequenas.

Mas como definir grau de mistura numa situação intermédia? O critério mais lógico e hoje universalmente usado é o de obter uma medida das flutuações de composição entre amostras retiradas da massa do pó através da variância (ou do desvio padrão) da composição das amostras obtidas.

Como se verá mais adiante, é possível prever matematicamente os valores da variância nos casos extremos, de modo que o valor da variância medida nas situações intermédias pode ser com eles comparado, gerando um certo número de índices de mistura que se encontram na literatura.

Infelizmente, a maioria desses índices não têm outro mérito do que variarem entre 0 e 1 (ou 0 e 100%), não havendo, na prática, razão para preferir um a outro; há sim a tendência para não usar nenhum deles, exprimindo os resultados em termos do desvio padrão.

Uma das razões pela qual se torna difícil construir um índice que seja verdadeiramente útil (e teoricamente fundamentado) reside no facto de a variância da composição de amostras retiradas de uma mistura em que os componentes estão totalmente separados (mistura segregada) ser independente do tamanho da amostra (desde que a amostra seja pequena comparada com a massa total de pó), enquanto que a variância da composição de amostras retiradas de uma mistura aleatória é inversamente proporcional ao tamanho da amostra. A variância de situações intermédias variará com a dimensão da amostra de uma forma intermédia e desconhecida, pelo que é fácil de ver que um dado índice de mistura fornecerá resultados diferentes se se variar o tamanho das amostras retiradas da mesma mistura, tornando-se assim duvidoso o valor das informações obtidas por seu intermédio.

Outra razão pela qual é impossível caracterizar completamente uma mistura por um só número reside no facto de a variância ser independente da ordem pela qual as amostras são retiradas.

Suponhamos o caso de duas misturas que por amostragem produziram amostras conforme ilustrado na Figura 2.

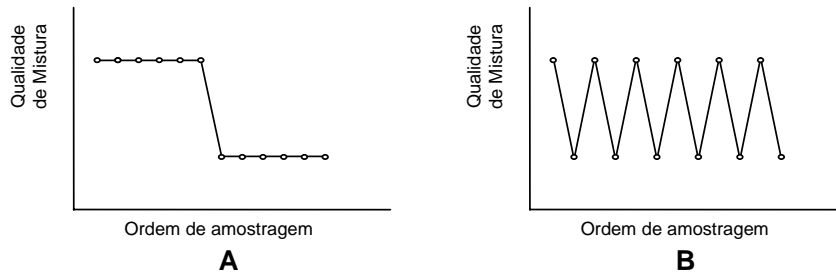


Figura 2 – Efeito da ordem de amostragem

Como é evidente, dado que as composições das amostras são iguais nos dois casos A e B, tanto a média como o desvio padrão também o serão. No entanto é evidente que as duas misturas terão características claramente diferentes

O que fica dito sobre as dificuldades inerentes à caracterização do grau de mistura chama a atenção para o problema da escolha do tamanho da amostra a utilizar, ou seja, da **escala de escrutínio**. Ora sucede que não existe “a priori” nenhum tamanho de amostra que deva ser preferido a outro, pelo que a escala de escrutínio a utilizar deverá ser determinada pela utilização que a mistura venha a ter.

Exemplificando, no caso de um adubo misto, o que de facto interessa garantir é que cada saco contém as devidas proporções dos vários constituintes, não interessando muito saber como é que estes se distribuem dentro do saco, já que, por mais regular que seja a mistura à saída da fábrica, nada garante que o seja ainda ao atingir o utilizador, devido às múltiplas oportunidades de segregação que inevitavelmente ocorrem pelas vibrações a que o saco é sujeito durante o transporte. No caso de um corante que se adiciona a um plástico, o que interessa é que as flutuações de tonalidade do produto (um balde, por exemplo) não sejam suficientemente grandes para serem apreciadas pela vista humana.

Assim, ao encarar-se um problema de mistura, a primeira preocupação deve ser a de determinar qual a escala de escrutínio relevante, e só em seguida procurar quantificar o grau de mistura, para essa escala de escrutínio, tendo sempre em conta que, quanto menor for a escala de escrutínio mais exigente se está a ser, e que **os resultados obtidos com uma dada escala de escrutínio não são válidos senão nessas condições**. Nalguns casos, como é o exemplo do saco de adubo composto, a verosimilhança de uma intensa segregação durante o posterior transporte, aconselha até a que, em vez de um problema de mistura, se considere a dosagem dos vários constituintes para dentro do saco sem qualquer mistura prévia.

5. SEGREGAÇÃO E MISTURA

A operação de **Mistura** consiste na dispersão das partículas de dois ou mais constituintes no seio uns dos outros.

Nos primeiros estudos de mistura levados a cabo procurou-se simplificar o problema usando apenas 2 constituintes que diferiam entre si apenas por alguma característica, como a cor, que não interferisse no processo de mistura.

O grau de mistura era seguido ao longo do tempo, e verificou-se que, qualquer que fosse o misturador usado, ao fim de um tempo suficientemente longo, se atingia uma mistura aleatória. Os vários misturadores e as diversas formas de os operar, apenas diferiam na velocidade com que a mistura aleatória era atingida.

Sucedem, porém, que um sistema deste tipo (chamado de partículas brancas e negras) não corresponde, em geral, aos sistemas que, na prática, se pretendem misturar, e a extensão dos estudos acima referidos a casos mais realistas complicou muito a questão.

Em primeiro lugar verificou-se que, em sistemas em que os componentes apresentavam características diferentes, o método de carga do misturador influenciava o tipo de variação do grau de mistura ao longo do tempo que se obtinha, conforme ilustrado na Figura 3.

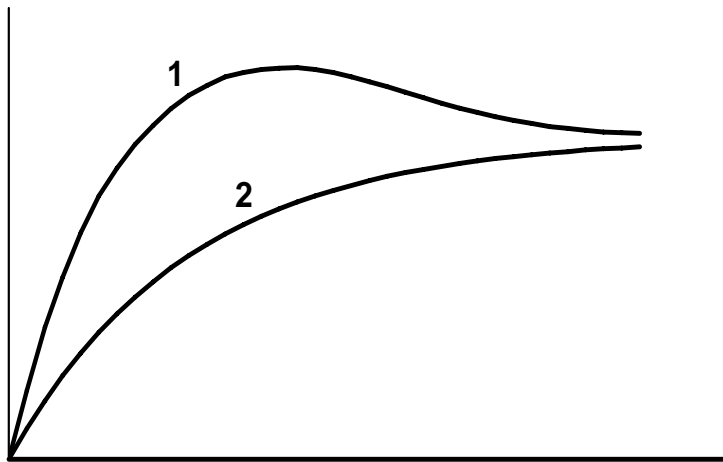


Figura 3 – Evolução do grau de mistura ao longo do tempo com :
1 – o componente mais fino ou mais denso em cima
2 – o componente mais fino ou mais denso em baixo

Nalguns casos o grau de mistura aumentava monotonamente (curva 2 da Fig. 3), enquanto que noutros casos passava por um máximo (curva 1 da Fig. 3), e depois diminuía tendendo para o mesmo valor limite do caso anterior. Em segundo lugar, este valor limite, que corresponde à mistura de equilíbrio, já não era independente do tipo de misturador usado, nem das condições de operação. Assim, a eficiência de um misturador passava a ser avaliada, não só pelo tempo necessário para se atingir a mistura de equilíbrio, mas também do grau de mistura que, em equilíbrio, se obtinham. Mais ainda, para um dado misturador, o grau de mistura em equilíbrio dependia de factores operativos, tais como a velocidade de operação ou o grau de enchimento.

O que, no entanto, se tornou claro, foi que, para numerosos sistemas, **determinados tipos de partículas mostravam nítida preferência por certas localizações no misturador em detrimento de outras, manifestando-se assim o fenómeno da segregação.**

Verificou-se igualmente que os pós atreitos à segregação eram os pós soltos, enquanto que os pós coesivos não segregavam de forma sensível.

A segregação ocorre porque as partículas dos vários componentes da mistura não reagem da mesma forma às forças externas impostas ao sistema. Nos **pós soltos**, as forças externas são as que predominam, o que origina que as partículas dos vários componentes tendam a comportar-se de forma diferente, dando azo à **segregação dos componentes**. Nos **pós coesivos**, as forças predominantes são as internas, de modo que as diferenças de reacção às forças externas dos vários tipos de partículas presentes são escamoteadas pela predominância das forças internas e a **segregação não ocorre**.

Em face do exposto se verifica que quando uma mistura que não atingiu o grau de mistura aleatória, isso pode configurar duas situações diferentes: ou a operação de mistura não foi suficientemente prolongada (**mistura insuficiente**), ou os componentes segregam (**mistura incompleta**).

Os dois tipos de dificuldades excluem-se mutuamente, isto é, os pós soltos, embora segreguem, atingem a mistura de equilíbrio ao fim de um tempo relativamente curto, enquanto que os pós coesivos, se bem que não segreguem, demoram em geral muito mais tempo a misturar.

A segregação dos pós soltos pode ser combatida através da introdução no sistema de factores que lhes confiram uma dose controlada de carácter coesivo, como, por exemplo, pequenas adições de água (até 1%). Claro que este expediente só poderá ser usado se **todos** os componentes da mistura forem inertes à água, não porosos e facilmente molháveis.

Por este processo é, por vezes, possível alterar as condições de mistura, reduzindo-se apreciavelmente a segregação.

Um caso curioso é o que se passa quando se **mistura um pó solto com um pó coesivo**. O que sucede é que as partículas do pó coesivo tendem a recobrir as do pó solto, e a mistura comporta-se, em geral, como não segregativa.

Trata-se de um efeito semelhante ao que se verifica na moagem, onde, a partir de uma certa dimensão do pó moído, a tendência agregativa das partículas mais pequenas iguala a redução de tamanho conseguida com o prolongamento da moagem, pelo que este se torna injustificado.

Este efeito deve-se ao facto de a força de ligação entre uma partícula grande e uma pequena ser maior do que a que une duas partículas pequenas, resultando num recobrimento das maiores pelas menores, o que é uma forma de, na prática, realizar um arranjo ordenado.

6. MECANISMOS DE SEGREGAÇÃO E MISTURA

Tanto a segregação como a mistura só ocorrem quando as partículas do pó estão em movimento.

A mistura pode processar-se de 3 formas distintas:

- i) – **Mistura difusiva** – Ocorre quando as partículas rolam por um plano inclinado, já que se verificam frequentes e aleatórias mudanças de direcção nas suas trajectórias.
- ii) – **Mistura por deformação** – Ocorre quando o escorregamento no seio do pó permite a troca de posição de partículas de camadas vizinhas.
- iii) – **Mistura convectiva** – Ocorre quando grupos de partículas são transportadas em conjunto de uma zona do pó para outra.

No caso de uma mistura não segregativa todos estes mecanismos contribuem para a mistura, embora em boa verdade o mecanismo difusivo esteja normalmente ausente, pois, sendo os pós coesivos o que rola pelos taludes são normalmente aglomerados de partículas, os quais são sujeitos a um mecanismo difusivo; porém como os aglomerados contém várias partículas que se movem em conjunto, a acção tem igualmente carácter convectivo. Porém, para misturas segregativas tanto o mecanismo difusivo como o de deformação são pouco eficazes, já que as partículas mais pequenas têm tendência a comportar-se de uma forma diferente das maiores, gerando segregação.

No caso da mistura difusiva, a proporção das partículas pequenas que rolam do topo até ao fundo do talude é menor do que a das partículas grandes, originando segregação. No caso da mistura por deformação, haverá maior facilidade passarem da camada superior para a inferior, enriquecendo-se uma em grossos e a outra em finos.

Estas considerações apontam para um dos principais mecanismos da segregação, que é a percolação preferencial das partículas mais pequenas e, em menor escala, as mais densas. Embora em geral a forma das partículas seja de pouca importância no que se refere à segregação, casos há em que formas extremamente afastada da esférica (palhetas, fibras) dificultam a percolação dessas partículas, gerando segregação.

A segregação por percolação pode ocorrer nos seguintes casos:

- i) – **Na formação de um talude** – Quando uma torrente de pó se escoia sobre camadas de pó imóvel, a espessura da camada em movimento é pequena, e, enquanto que a direcção da velocidade das partículas maiores é paralela à direcção de escoamento, as partículas menores, em virtude da tendência que têm de percolar entre as maiores, têm uma componente de velocidade normal à direcção de escoamento, pelo que, em geral, atingem a zona imóvel antes de atingir a base do talude, o que origina segregação.
- ii) – **Segregação por vibração** – Neste caso toda a massa de pó está em movimento, e a componente média horizontal da velocidade de todas as partículas é nula. A componente vertical, porém não o será, dado que as partículas mais pequenas ou mais densas terão maior facilidade em ocupar os vazios que ocorrem na camada imediatamente inferior à que ocupam. Assim os finos (ou as partículas mais densas) tenderão a ir para o fundo, enquanto que os grossos (ou as partículas menos densas) tenderão a vir para a superfície.
- iii) – **Segregação por deformação** – O fenómeno é idêntico ao anterior, mas limitado aos planos de escorregamento que ocorrem no interior do pó, por exemplo, por gradientes de velocidade.

Outra causa de segregação reside no facto de partículas diferentes se moverem com velocidades diferentes sob a acção do mesmo impulso, podendo-se distinguir dois casos:

- i) – **Segregação de trajectórias** – Desde que o fluxo de pó não seja vertical, as partículas terão sempre uma componente horizontal de velocidade, a qual projecta as partículas a menor distância para as partículas mais pequenas (e em menor grau para as menos densas).
- ii) – **Segregação por ressalto** – Quando as partículas do pó são projectadas contra um obstáculo (por exemplo a parede interna do misturador), as partículas mais rígidas recuperam uma maior proporção da sua velocidade inicial, ressaltando até uma distância maior.

Os factores atrás mencionados que causam diferença de comportamento das partículas podem ser assim ordenados:

Tamanho – de longe o mais importante

Densidade

Forma }
Resiliência } – em geral de somenos importância

7. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO GRAU DE MISTURA

Muitas descrições estatísticas dos pós foram baseadas em duas hipóteses fundamentais:

- i) – Que as partículas do pó são idênticas e apenas distinguíveis por uma característica, como a cor, que não interfere no processo de mistura.
- ii) – Que as partículas são independentes umas das outras.

Embora se tenham feito muitas tentativas para caracterizar o grau de mistura por um índice, hoje todos usam como quantidade experimentalmente medida a variância s^2 (ou o desvio padrão s) da composição das amostras retiradas da mistura.

LACEY demonstrou que, para uma mistura de partículas brancas e pretas, o valor experimental da variância devia estar compreendido entre dois valores extremos, a **variância segregada** σ_o^2 e a **variância aleatória** σ_r^2 . Se a fracção em massa de um dos constituintes for C teremos

$$\sigma_o^2 = C \times (1-C) \quad \text{e} \quad \sigma_r^2 = C \times (1-C) / n$$

em que n é o número de partículas na amostra.

Desde então os valores de σ_o^2 e σ_r^2 têm sido usados como padrões com os quais a variância experimental é comparada de muitos modos, gerando os numerosos índices de mistura que se encontram na literatura.

Para uma compilação destes índices ver o artigo de FAN e WANG, “On Mixing Indexes”, Powder Technology, **11**, (1975), pág. 27-32.

Das expressões apresentadas para σ_o^2 e σ_r^2 se verifica, como já dissemos, que a variância segregada é independente do tamanho da amostra, enquanto que a variância aleatória s^2 é inversamente proporcional.

WILLIAMS demonstrou que, neste caso, a variância de uma situação intermédia será dada por

$$s^2 = L - (\sigma_o^2 - L)/n$$

Em que L é um parâmetro independente do tamanho da amostra. De facto, o valor de L representa o valor que se obteria se fosse possível amostrar a mistura retirando dela amostras infinitamente grandes (quando $n \rightarrow \infty$ $s^2 \rightarrow L$), e representa por isso uma característica intrínseca da mistura.

Fazendo $M = 1 - L/\sigma_o^2$ podemos escrever

$$s^2 = \sigma_o^2 \times (1 - M + M/n)$$

Daqui se vê que, se $M = 0$, então $s^2 = \sigma_o^2$, enquanto que, se $M = 1$, e então teremos $s^2 = \sigma_o^2/n = \sigma_r^2$.

O valor de M representa assim, para este sistema, um dos raros índices com justificação teórica.

Sucedem porém que, na prática, os pós que se misturam não se coadunam com o modelo de partículas brancas e pretas, embora em muitos casos se tenham continuado a usar os valores de σ_o^2 e σ_r^2 anteriormente definidos, mesmo nos casos em que havia nítidas diferenças de características entre os componentes da mistura.

Um importante salto em frente foi dado quando se abandonou a hipótese de as partículas serem idênticas, tendo STANGE e BUSLIK, independentemente e por métodos diferentes, chegado a fórmulas para o valor de σ_r^2 que posteriormente se provou serem idênticas.

A fórmula apresentada por BUSLIK (Bull. An. Soc. Test. Mat., nº 185 (1950), pág. 66) para a variância aleatória de uma mistura de partículas de várias dimensões, em que a partícula de massa m_i está presente com uma fracção em massa C_i , tomando o constituinte i como o constituinte chave, sendo m_s a massa das amostras, é

$$\sigma_r^2 = \frac{m_i \times C_i \times (1 - C_i) + C_i^2 \times (m - m_i)}{m_s}$$

em que $\bar{m} = \sum m_i C_i$ é a massa média das partículas presentes na mistura.

A equação de LACEY para a variância aleatória, torna-se assim um caso particular da equação de BUSLIK, quando $m_i = \bar{m}$, e portanto o número de partículas na amostra será $n = m_s / \bar{m}$.

Uma vez que a variância segregada é independente do tamanho da amostra, a equação de LACEY que dá o valor de σ_o^2 mantém-se válida neste caso.

Se contudo se abandonar a hipótese segundo a qual as partículas são independentes umas das outras, nem o valor de σ_o^2 nem o de σ_r^2 se podem calcular pelas fórmulas anteriores, tornando-se em contrapartida necessário saber-se o modo como as partículas se associam.

Qualquer que seja a natureza das forças que causam agregação das partículas do pó, uma partícula pequena estará sempre mais fortemente ligada a uma partícula grande do que a outra partícula igual. Este facto é encorajante, já que é de prever que, ao fim de um grande número de ciclos de quebra de ligações – restabelecimento de ligações, acabe por predominar a associação de partículas desiguais, conduzindo a uma boa mistura.

Consideremos uma mistura binária, de massa total M , em que a razão do tamanhos dos grossos e do finos seja m , a massa de um fino seja m_f , a fracção em massa dos grossos seja C , o número total de agregados na mistura seja N , e a probabilidade de um agregado conter i finos e j grossos seja $\Phi(i,j)$.

Neste caso já não é, em geral, possível definir variância segregada da mesma forma, já que, em geral haverá agregados que contêm tanto grossos como finos.

Nestas condições prova-se que

$$\sigma_o^2 = C \times \left[\frac{\sum_{ij} \frac{m^3 j^2}{i + m^3} \times \Phi(i,j)}{\sum_{ij} j \times \Phi(i,j)} - C \right]$$

e que

$$\sigma_r^2 = \frac{N \times m_f}{M \times m_s} \times \sum_{ij} \{ [i \times C - j \times m^3 \times (1-C)]^2 \times \Phi(i,j) \}$$

em que m_s é a massa da amostra.

Demonstra-se igualmente que ambas estas fórmulas se reduzem às anteriores (de BUSLIK e de LACEY) nos casos particulares correspondentes, e que conduzem a valores de σ_o^2 e σ_r^2 que são sempre inferiores àqueles que se obteriam na hipótese de as partículas serem independentes umas das outras. Isto é coerente com o facto experimentalmente constatado de que os pós coesivos (em que há grande agregação entre partículas) não são segregativos.

A adição de pequeníssimas quantidades de humidade a pós soltos (desde que as partículas sejam inertes em relação à água) introduz um certo grau de agregação e conduz a melhores misturas de equilíbrio. No caso dos pós coesivos, não é necessário nem conveniente procurar aumentar o grau de agregação do pó, pois isso iria apenas servir para diminuir a velocidade de mistura, sem que se melhorasse sensivelmente o normalmente bom grau de mistura em equilíbrio.

8. MISTURADORES

Os **misturadores** são aparelhos destinados a realizar a mistura, e em todos eles têm lugar os vários mecanismos de mistura atrás referidos.

No entanto, conforme a concepção do misturador, assim um ou outro dos mecanismos predomina. Os dois mecanismos mais característicos são o difusivo e o convectivo, de modo que **dividiremos os misturadores em difusivos e convectivos** conforme o mecanismo predominante.

Misturadores Difusivos

São misturadores que usam predominantemente o mecanismo difusivo de mistura, ou seja, em que esta se processa através das frequentes e repetidas mudanças aleatórias de direcção das partículas ao rolar sobre um talude.

São exemplos deste tipo de misturadores os seguintes:

- Cilindros horizontais ou inclinados
- Misturadores em V ou em Y
- Duplo cone
- Rotacubo

Em todos os casos a carcaça do misturador roda em torno de um eixo, frequentemente horizontal, sendo o pó posto em movimento por arrastamento sobre as paredes internas do misturador.

Dado que a carcaça do misturador roda, haverá uma velocidade crítica de operação, a partir da qual a força centrífuga fará com que o pó seja centrifugado, cancelando mistura.

Alguns destes misturadores têm no seu interior pás que procuram provocar uma certa dose de convecção, melhorando as características do misturador.

De um modo geral os fabricantes procuram, através da forma da carcaça, gerar taludes que se interceptem, mas isto não afecta a qualidade da mistura em equilíbrio.

Apesar destes inconvenientes são muito frequentemente utilizados, em virtude do seu baixo custo e da sua facilidade de limpeza.

Misturadores Convectivos

São misturadores que fazem predominantemente uso do mecanismo convectivo de mistura, isto é, de transporte de porções do pó de uma zona para outra.

São exemplos deste tipo de misturadores os seguintes:

- Nauta
- Misturador de hélice ("Ribon Blender")
- Lödige
- Leitos fluidizados por gás

Em todos os casos a carcaça do misturador é fixa, sendo o movimento causado por pás que geram correntes de convecção. No caso dos leitos fluidizados por gás, a mistura processa-se aquando da subida das bolhas do gás que borbulha através do leito.

São normalmente bastante melhores do que os difusivos, sendo muito menos atreitos a segregação durante o funcionamento, sendo no entanto geralmente mais caros e de mais difícil limpeza do que os misturadores difusivos.

Outras considerações

Um dos grandes perigos, ao encarar uma operação de mistura, reside na tendência em acreditar que, uma vez misturados, os pós se conservam misturados ao longo do processo. Isto é razoável para os pós coesivos, mas é certamente falso para pós soltos. A própria operação de descarga do misturador pode desfazer parcialmente a mistura, pelo que é conveniente avaliar-se a eficiência do misturador na torrente de saída e não no seu interior, já que a qualidade de mistura que se atinge no misturador é frequentemente melhor do que a que a torrente de saída apresenta.

Há que ter em conta que o transporte da mistura (por exemplo em transportadores de correia) ou o seu armazenamento intermédio, causam normalmente segregação nos pós soltos, pelo que o misturador deverá ser localizado tão perto quanto possível do ponto de utilização da mistura.

A maior parte dos misturadores são de operação descontínua, mas deverá preferir-se, sempre que possível, a utilização de misturadores contínuos, que dão normalmente melhores resultados, para as misturas segregativas.

O maior problema ligado ao uso de misturadores contínuos reside no facto de eles requererem alimentação contínua, o que pode ser difícil de conseguir na prática, sobretudo quando as proporções dos vários componentes é muito diferente.

Nesses casos, é aconselhável realizar a mistura em várias etapas, em cada uma das quais o componente minoritário é diluído no componente maioritário, com controlos de composição intermédios, e, se necessário, os correspondentes ajustes de composição. Estes ajustes **não deverão ser feitos por adições de pequenas quantidades do constituinte minoritário, mas antes por ajuste da proporção do componente maioritário.** Recomenda-se que em cada uma das etapas a diluição realizada não seja superior a 10x .

Em alguns casos o uso de misturadores é mesmo inútil, sobretudo quando a mistura antecede imediatamente a embalagem, pois é quase certo que, se a mistura for segregativa, o transporte da embalagem da fábrica para o local de consumo destruirá parcialmente a mistura. Nesses casos, o mais adequado é proceder à dosagem correcta para dentro da embalagem, **chamando a atenção do consumidor para a necessidade de não usar só parte do conteúdo da embalagem.**

Na escolha de um misturador deverá sempre começar-se por verificar se a mistura é segregativa ou não.

Se não segregam, qualquer tipo de misturador serve, sendo a escolha feita tendo por base o custo de aquisição, o custo de operação (incluindo limpeza), rapidez de mistura, nível de ruído, espaço ocupado, entre outros critérios pertinentes para cada caso particular.

Se a mistura a obter for segregativa, deve-se tentar estabilizá-la por uma pequena adição de água (1-2% é geralmente suficiente para partículas até 2-3 mm), se tal for compatível com o processo de fabrico, devendo então usar-se um misturador difusivo (por exemplo em V ou rotacubo). Nalguns casos a escolha do material de construção do misturador poderá gerar no pó electricidade estática com um efeito semelhante.

Se a estabilização da mistura não for suficiente deve-se escolher um misturador convectivo, em V ou o de hélice. A utilização de leitos fluidizados pode ser indesejável por causa do arrastamento de parte dos finos do leito, o que origina perdas, sobretudo quando o componente mais fino é o mais valioso, como é frequentemente o caso.

É preciso notar que os resultados obtidos com misturadores difusivos são muito influenciados pelas condições de operação, a optimização das quais não depende só do misturador, mas também, e muito, dos componentes a misturar.

Por esta razão deve-se, sempre que possível, exigir do fabricante um teste com a mistura a ser processada.

9. ARMAZENAGEM E TRANSPORTE

Apenas algumas notas, para chamar a atenção para o risco de, tendo-se conseguido uma boa mistura, esta ser parcialmente desfeita. Como se disse, **há oportunidades de segregação sempre que as partículas do pó têm movimento umas em relação às outras.**

Já se referiu o risco de vibrações durante o transporte causarem segregação dos constituintes do pó misturado, por exemplo sobre uma tela transportadora. A este risco há a adicionar o de segregação de trajectória, o qual ocorre normalmente quando a tela descarrega, e que será tanto mais pronunciado quanto maior for a velocidade de avanço da tela.

A estes riscos deve ainda adicionar-se o do mau desenho dos silos de armazenagem. Com efeito, num silo mal desenhado, a descarga dá-se apenas na parte central do silo, o que pode originar considerável segregação por deformação. Acresce que, num tal silo, o tempo de armazenagem de várias porções do pó pode ser muito variável.

Se o silo não é periodicamente descarregado até ao fim, uma vez que o seja poderá fornecer material que lá está há muito tempo, já que as zonas periféricas junto à base são zonas mortas, onde o material pode permanecer indefinidamente. Isto é particularmente importante quando o material tem prazo de validade, pois material muito antigo pode contaminar os lotes em produção, causando sérios prejuízos.

Sobre o desenho de silos que não enfermem deste defeito há abundante bibliografia, e métodos de cálculo de confiança.

Neste ponto apenas referirei que um silo com abertura circular é muito mais atreito a este tipo de problemas do que os silos com descarga por fenda com comprimento semelhante à largura do silo.

BIBLIOGRAFIA

T. ALLEN, Particle Size Measurement, Ed. CHAPMANN & HALL

MIXING IN THE PROCESS INDUSTRIES, Post Experience Course, University of Bradford, 1974

FLOW AND STORAGE OF BULK SOLIDS, Post Experience Course, University of Bradford, 1975

A. W. JENIKE, Storage and Flow of Bulk Solids, University of Utah Engineering Bulletin N° 123, (1964)

J. C WILLIAMS, The Mixing of Dry Powders, Powder Technology, **2** (1968/69), 13-20