

ARTIGO REF: 6438

ESCOAMENTO DE DUAS FASES: LEITO FLUIDIZADO A DIFERENTES PRESSÕES

Mário Talaia^(*)

Universidade de Aveiro, Departamento de Física (CIDTFF) - Aveiro, Portugal

^(*)*Email:* mart@ua.pt

RESUMO

Neste trabalho são apresentados vários exemplos experimentais de leitos fluidizados (areia e ballotini) atravessados por uma corrente de gás (ar comprimido ou argon). A parede interna da coluna vertical (em aço ou perspex) controla o movimento das partículas. As experiências foram realizadas a diferentes pressões, com o objetivo de interpretar sinais e conhecer a influência da pressão na massa volúmica do gás.

É apresentado um novo conjunto de experiências realizadas a uma pressão de 5bar num leito fixo de partículas de ballotini de 0,200mm ou 0,490mm.

As imagens e os sinais registados pelos transdutores diferenciais de pressão permitiram caracterizar o comportamento do leito, a frequência da formação de bolhas tubulares, propriedades físicas do gás e do leito fluidizado e velocidade das bolhas tubulares.

INTRODUÇÃO

Se um gás atravessar um leito de partículas o leito permanece inalterável até que a velocidade da corrente gasosa atinja um valor crítico que vai colocar as partículas em suspensão. Nessa situação, a queda de pressão medida, por exemplo, na base do leito é igual ao peso das partículas por unidade de área na base do leito permite a determinação da velocidade mínima de fluidização.

Se a corrente gasosa for aumentada acima das condições mínimas para ser gerado leito fluidizado, o leito expande-se de modo a que os interstícios entre partículas aumentarão. Se essa corrente gasosa aumentar ainda mais observa-se a formação de bolhas gasosas que ascendem no interior do leito. Estas bolhas são formadas com base no excesso de gás que é determinado pela diferença entre o caudal de gás injetado e o caudal de gás que gera condições de fluidização. Se a corrente gasosa continuar a aumentar as bolhas tomam o aspecto de “balas” axiais ou bolhas tubulares (em inglês “slugging”).

Para caudais elevados de gás, a agitação no interior do leito torna-se violenta e o movimento das partículas fica vigoroso, provocando grande instabilidade. Para um caudal de gás suficientemente elevado a velocidade terminal das partículas pode ser excedida e a superfície superior do leito desaparece observando-se um transporte pneumático de partículas para fora do leito.

O estudo dinâmico de bolhas em leitos fluidizados é importante em diversas aplicações, nomeadamente na formação de dunas, no transporte pneumático de partículas e na separação

de partículas, ver por exemplo Bagnold (1973), Ogawa e Beddow (1984) e Davidson *et al* (1985).

Neste trabalho é apresentada a teoria de duas fases aplicada a diferentes leitos fluidizados. São apresentados alguns exemplos e é feita uma abordagem comparativa de experiências entre leitos de diferentes partículas de ballotini e com a mesma pressão absoluta interior com alteração do caudal de ar injetado na base de uma coluna.

FLUIDIZAÇÃO

Normalmente as partículas usadas em leitos apresentam uma distribuição de diferentes tamanhos. O diâmetro médio das partículas d_p pode ser avaliado a partir da fórmula,

$$d_p = 1 / \left[\sum_i (x_i / d_{pi}) \right] \quad (1)$$

em que x_i representa a fracção do peso das partículas de diâmetro d_{pi} , em cada gama de partículas considerada.

A velocidade mínima de fluidização, u_{mf} , em que $u_{mf} = u_{mf}(\rho_p, \rho_g, d_p, \mu_g)$ acontece quando pela primeira vez, à menor velocidade superficial ($U_s = Q_g/A$) o peso das partículas iguala $\Delta P_f (\pi/4) D^2$, ou seja $\Delta P_f = (\rho_p - \rho_g) L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) g$, em que ρ_p representa a massa volúmica das partículas, ρ_g a massa volúmica do gás, μ_g a viscosidade dinâmica do gás, Q_g o caudal do gás, A a área da secção recta da coluna, ΔP_f a queda de pressão nas condições mínimas de fluidização, L_{mf} a altura do leito de partículas na condição mínima de fluidização, g a aceleração da gravidade local e ϵ_{mf} a porosidade do leito de partículas nas condições mínimas de fluidização (Davidson e Harrison, 1963; Geldart, 1986; Ergun, 1952; Kunii e Levenspiel, 1991).

A velocidade superficial de um leito de partículas é determinada através da expressão

$$U = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Na literatura disponível da especialidade há inúmeras expressões que permitem avaliar o valor da velocidade mínima de fluidização [uma das mais usadas é a formula de Ergun (1952)]. Por exemplo, Geldart e Abrahamsen (1981) mostraram que quando $d_p < 100 \mu m$,

$$Re_{mf} = \frac{\left[(\rho_p - \rho_g) g \rho_g \right]^{0,934} d_p^{2,8}}{1111 \mu_g^{1,87}} \quad (3)$$

e, Talaia (2002a) mostrou que quando $d_p > 100 \mu m$,

$$Re_{mf} = \left[(28,7)^2 + 0,0428 Ga \right]^{1/2} - 28,7^2 \quad (4)$$

em que $Ga = \left[\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g \right] / \mu_g^2$ é o número de Galileu (também conhecido por número de Arquimedes, Ar) e $Re_{mf} = (\rho_g u_{mf} d_p) / \mu_g$ o número de Reynolds nas condições mínimas de fluidização.

A expressão (4) pode apresentar o aspeto geral

$$Re_{mf} = \left[(C_1)^2 + C_2 Ga \right]^{1/2} - C_1^2 \tag{5}$$

quando são introduzidas as constantes C_1 e C_2 . Vários autores indicam na literatura diferentes valores para essas constantes conforme se mostra na Tabela 1.

Tabela 1 - valores para as constantes da expressão (5)

Autores	C_1	C_2
When e Yu (1966)	33.7	0.0408
Richardson (1971)	25.7	0.0367
Saxena e Vogel (1977)	25.3	0.0571
Babu <i>et al.</i> (1978)	25.3	0.0651
Grace (1982)	27.2	0.0408
Chitester <i>et al.</i> (1984)	28.7	0.0494
Talaia (2002a)	28.7	0.0428

Em experiências cuja pressão do gás injetado e no interior da coluna é superior à pressão atmosférica devem ser usadas as seguintes expressões que são introduzidas na resolução da expressão (5)

$$Ga = \frac{\rho_g p_{ic}}{\mu_g^2 p_0} d_p^3 \left(\rho_p - \rho_g \frac{p_{ic}}{p_0} \right) g \tag{6}$$

e

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p p_{ic}}{\mu_g p_0} \tag{7}$$

em que p_{ic} representa a pressão absoluta no interior da coluna e p_0 a pressão atmosférica.

A velocidade terminal das partículas, U_t , pode ser avaliada a partir do conhecimento do número de Galileu. Este, como já referido, depende apenas das propriedades físicas das partículas e do gás. Schiller e Naumann (1933) mostraram que a velocidade terminal das partículas pode ser determinada usando a função $Ga = \phi(Re_t)$ de acordo com as seguintes condições fronteiras: para $Ga \leq 3,6 \rightarrow Ga = 18 Re_t$; para $3,6 < Ga \leq 10^5 \rightarrow Ga = 18 Re_t + 2,7 Re_t^{1,687}$ e para $Ga > 10^5 \rightarrow Ga = \frac{1}{3} Re_t^2$, ou seja, conhecido o valor do

número de Galileu, G_a , determina-se, por aplicação da expressão da condição fronteira, conforme a situação, o valor do número de Reynolds para a velocidade terminal, Re_t , sabendo que $Re_t = (\rho_g U_t d_p) / \mu_g$.

Na situação da injeção de gás registrar um caudal elevado o critério de Stewart (1965) pode ser testado dado definir condições de início de “slugging” a partir da expressão

$$\frac{(U - u_{mf})}{(0,35\sqrt{gD})} > 0,2 \quad (8)$$

em que D representa o diâmetro interno da coluna, u_{mf} a velocidade mínima de fluidização e U a velocidade superficial, que neste caso é mínima para formar bolhas tubulares. Na prática $(U - u_{mf})$ representa o excesso de gás que atravessa o leito fluidizado. Assim, este excesso de gás que atravessa o leito fluidizado pode formar bolhas tubulares isoladas que ascendem a uma velocidade relativa prevista u_r a partir da expressão

$$u_r = C\sqrt{gD} \quad (9)$$

deduzida teoricamente por uma análise dimensional e verificada experimentalmente para $C = 0,350$ por Talaia (2000). Também Dumitrescu indica $C = 0,351$, Davies e Taylor $C = 0,328$ e White e Beardmore $C = 0,345$.

Davidson e Harrison (1963) mostraram que a velocidade absoluta u_A de bolhas tubulares pode ser avaliada quando se aplica a expressão

$$u_A = (U - u_{mf}) + 0,35\sqrt{gD} \quad (10)$$

O valor experimental da velocidade absoluta de uma bolha tubular determina-se a partir da expressão

$$u_A = \frac{L}{\Delta t} \quad (11)$$

em que L representa a distância entre duas tomas instaladas na coluna e Δt o intervalo de tempo que demora, por exemplo, o nariz da bolha de gás a percorrer a distância entre as duas tomas escolhidas.

Na base de um leito de partículas deve ser instalado um distribuidor que controle o caudal injetado de gás. Assim sendo, o distribuidor é umas das peças mais importantes a ser projetada. Nas colunas usadas, neste trabalho, os distribuidores obedeceram à expressão,

$$Q_t = C_0^2 N^2 \pi \frac{2d_0^4 \Delta p}{16\rho_g} \left(\frac{p_0}{p_{ic}} \right) \quad (12)$$

em que Q_t representa o caudal teórico, C_0 um parâmetro adimensional (normalmente 0,61), N o número de furos no distribuidor, d_0 o diâmetro do furo (devem ser todos iguais) e Δp a

diferença de pressão medida entre duas tomas colocadas uma montante e a outra a jusante do distribuidor.

A experiência mostra que existe uma ligeira diferença entre o valor do caudal teórico avaliado por aplicação da expressão (12) e o valor obtido experimentalmente. Na prática, a expressão (12) deve ser corrigida por um factor K (quando se usa um rotâmetro para calibrar o caudal injetado e que atravessa o distribuidor).

Neste trabalho são apresentadas diferentes experiências para uma pressão absoluta de 5bar, com um distribuidor de $N=85$ e $d_0 = 0.6$ mm, quando se usam dois tamanhos de partículas de ballotini (200 μ m e 490 μ m). A expressão experimental, no sistema CGS, que permite avaliar a velocidade da corrente gasosa no interior da coluna (cm/s) é dada por

$$U_{ic} = 4,26 \sqrt{\Delta p_D \frac{p_0}{p_{ic}}} \quad (13)$$

em que Δp_D (em cmca) é registado por um transdutor diferencial de pressão, $p_0 = 1$ bar e $p_{ic} = 5$ bar.

A estabilidade da frente do leito de partículas pode ser analisada usando a seguinte expressão desenvolvida

$$L_1 = L_2 \left[\frac{\Delta p_2}{(\Delta p_1 - \Delta p_2)} \right] \quad (14)$$

em que L_1 representa a altura avaliada do leito acima da toma de controlo, L_2 a distância entre o distribuidor e a toma na coluna no topo da coluna, Δp_1 a diferença de pressão do leito (sinal registado pelo transdutor no topo da coluna) e Δp_2 a diferença de pressão de parte do leito acima da toma de controlo. Haverá estabilidade do leito se os resultados mostrarem que o valor máximo calculado para $L_1 + L_2$ é sempre inferior a altura interior da coluna, ou seja as experiências são válidas dado não terem sido criadas condições para o arrasto ou transporte de partículas para o topo da coluna ou para o exterior do sistema.

Talaia e Talaia (2001) deduziram uma expressão para avaliar a velocidade da corrente gasosa, dada por

$$U = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\rho_{ap} g} + u_{mf} \quad (15)$$

em que ρ_{ap} representa a massa volúmica aparente das partículas $[\rho_{ap} = \rho_p (1 - \varepsilon)]$ e $\Delta p/\Delta t$ a variação da pressão num determinado tempo.

A expressão (15) pode ser reescrita para avaliar o excesso de gás ($U - u_{mf}$) que atravessa um leito de partículas fluidizado, vindo

$$U - u_{mf} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\rho_{ap} g} \quad (16)$$

RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO

Apresentam-se alguns resultados obtidos experimentalmente, quando se usa um leito de partículas de areia ou de ballotini. Talaia (2002b) mostrou como um leito de partículas é influenciado quando na base de uma coluna se injeta um caudal de gás. Nas experiências realizadas usou ar comprimido, cujas propriedades físicas do ar foram as seguintes: $\rho_g = 1,21 \text{ kg.m}^{-3}$ e $\mu_g = 1,79 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$, a atravessar um leito de partículas (topo do leito aberto à atmosfera), com $\rho_p = 2582 \text{ kg.m}^{-3}$, $d_p = 196,2 \mu\text{m}$, $\varepsilon = 0,494$ (para o leito fixo) e $\varepsilon_{mf} = 0,499$ (leito nas condições de u_{mf}). A previsão da velocidade mínima de fluidização foi feita usando a expressão (4); vindo para $u_{mf_{previsto}} = 3,3 \text{ cm.s}^{-1}$.

Talaia (2002b) mostrou que nas condições experimentais e para uma velocidade superficial de gás de $U = 12,6 \text{ cm.s}^{-1}$, o critério de Stewart (1965) que define condições de início de bolhas tubulares a partir da expressão (8) foi considerado dado ser o valor mínimo de $u > 10,9 \text{ cm.s}^{-1}$. Também o valor teórico para a velocidade absoluta das bolhas tubulares foi avaliado a partir do resultado de Davidson e Harrison (1963), expressão (10), sendo o valor registado de $u_A = 43,3 \text{ cm.s}^{-1}$. Este valor está em concordância com a velocidade absoluta das bolhas tubulares isoladas e determinada a partir da expressão (11), com $L=60\text{cm}$, resultando $u_A = (41,8 \pm 0,2) \text{ cm.s}^{-1}$. Este valor mostra um erro relativo inferior a 4%.

A Figura 1 mostra os sinais registados em dois transdutores diferenciais de pressão para condições experimentais da velocidade superficial do gás de $12,6 \text{ cm.s}^{-1}$.

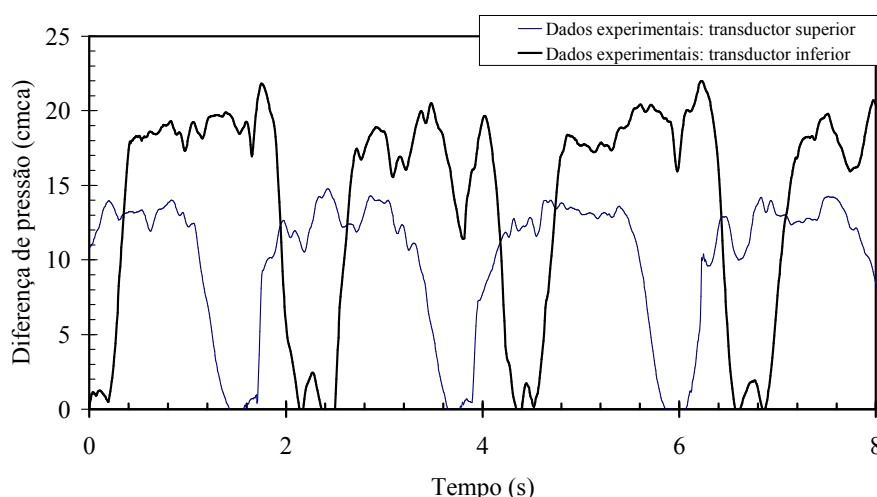


Fig. 1 - Bolhas tubulares: sinais registados para velocidade superficial de $12,6 \text{ cm.s}^{-1}$.

Talaia (2003a) estudou a estabilidade da interface gás/sólido, de um leito fluidizado de partículas de ballotini, a alta pressão, atravessado com uma corrente de argon. Os sinais registados mostram que o leito permanece inalterável até que a velocidade da corrente gasosa atinja um valor crítico que vai colocar as partículas em suspensão, situação esta que permite

determinar a velocidade mínima de fluidização. Para a realização experimental colocaram-se no interior da coluna de aço, de diâmetro interior de 77,92mm, 14755g de ballotini ocupando uma altura de cerca de 203cm de leito fixo. As propriedades físicas para o argon são: $\rho_g = 1,69 \text{ kg.m}^{-3}$ e $\mu_g = 2,1 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ e para o leito de ballotini $\rho_p = 2580 \text{ kg.m}^{-3}$, $d_p = 200 \mu\text{m}$ e $\varepsilon = 0,419$ (leito fluidizado).

Na Figura 2 são mostrados os sinais registados por dois transdutores diferenciais de pressão para uma experiência a 35bar. De acordo com a expressão (13), em que U_{ic} representa a velocidade superficial no interior da coluna, $U_{ic} = (12,12 \pm 0,11) \text{ cm.s}^{-1}$ e nestas condições regista-se um excesso de gás de $9,75 \text{ cm.s}^{-1}$. A velocidade de ascensão das bolhas tubulares foi determinada a partir dos sinais resultando em $(31,74 \pm 1,64) \text{ cm.s}^{-1}$.

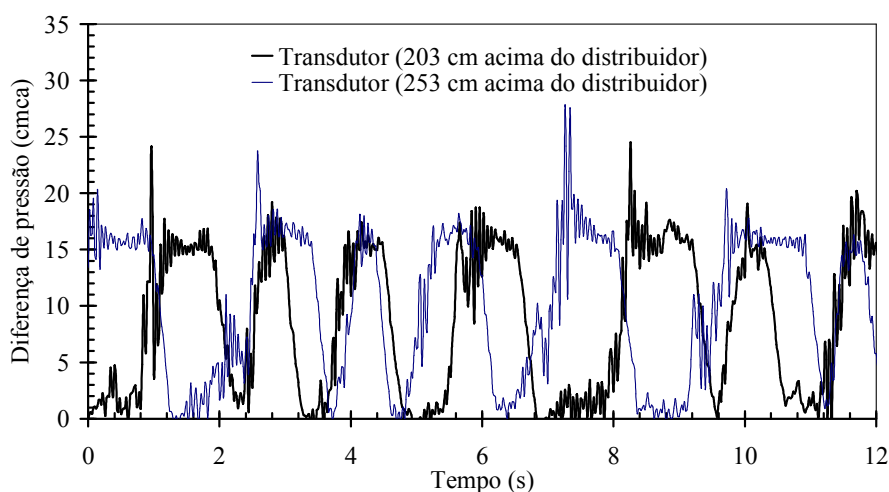


Fig. 2 - Sinal registado para um excesso de argon de $9,75 \text{ cm.s}^{-1}$, com $U_{ic}=12,12 \text{ cm.s}^{-1}$ e $P_{ic}=35 \text{ bar}$.

A estabilidade da frente do leito fluidizado foi analisada e confirmada, de acordo com a aplicação da expressão (14) em que L_1 representou a altura avaliada do leito acima da toma 103cm, L_2 a distância entre o distribuidor e a toma de controlo (103cm), Δp_1 a diferença de pressão do leito (sinal registado pelo transdutor no topo da coluna) e Δp_2 a diferença de pressão de parte do leito acima de 103cm (sinal registado pelo transdutor acima do distribuidor). Talaia (2003a) mostrou, ainda, que desde que as tomas que se ligam aos transdutores diferenciais de pressão sejam devidamente posicionadas é possível estudar o comportamento da frente do leito, registar a variação da pressão no tempo e determinar a velocidade da superfície do leito. A Figura 3 mostra os sinais registados para uma velocidade superficial de $8,92 \text{ cm.s}^{-1}$.

A análise do gráfico da Figura 3 permite determinar o declive ($\Delta p/\Delta t$), sendo o valor experimental, no sistema S.I., dado por $(633,10 \pm 0,29) \text{ Pa.s}^{-1}$. A expressão (15) foi aplicada e o valor determinado experimentalmente para a velocidade da corrente gasosa injectada na coluna foi de $(8,99 \pm 0,12) \text{ cm.s}^{-1}$, sendo um valor preciso e exato face ao registado de $8,92 \text{ cm.s}^{-1}$ no rotâmetro.

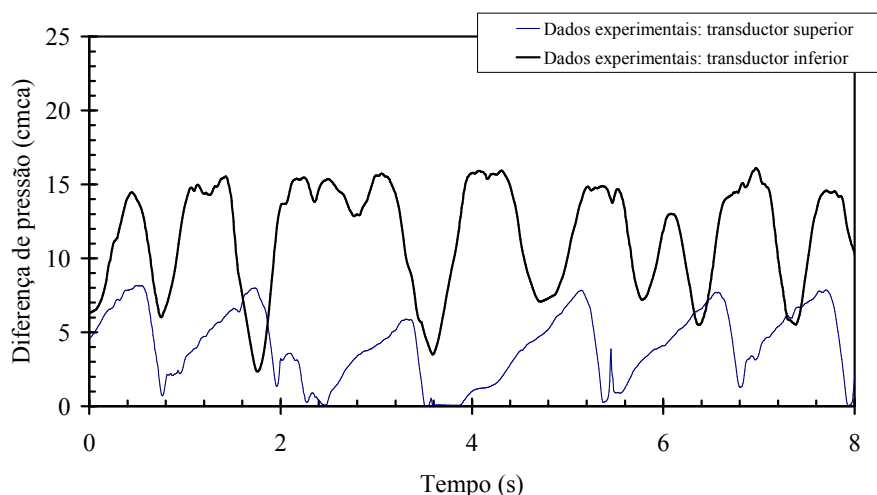


Fig. 3 - Condições de borbulhamento para $U=8,92\text{cm.s}^{-1}$.

Talaia (2002a) mostrou que em condições mínimas para o início da fluidização é possível deduzir uma expressão para prever a velocidade mínima de fluidização a partir do aumento da velocidade superficial do gás e da fração vazia como função da pressão absoluta. O autor também estudou a expansão do leito fluidizado em altura. Este tipo de experiências a alta pressão é onerosa e com algum risco. O artigo do autor mostra que foram realizadas experiências numa coluna vertical de aço (parede interna polida) com uma altura de 3,00m e um diâmetro interior de 77,92mm. Foram usadas areias com um diâmetro médio de $205\mu\text{m}$ com uma densidade absoluta de 2580kg.m^{-3} . Na coluna foi colocada uma quantidade de 8,586kg que formou uma altura de leito com 1,32m. O leito foi fluidizado com argon cujas propriedades físicas à pressão atmosférica são: densidade absoluta de 1.69kg.m^{-3} e uma viscosidade dinâmica de $21\times 10^{-6}\text{Pa.s}$. Uma nova expressão para prever a velocidade mínima de fluidização é apresentada e as constantes da expressão (5) tomam os valores para C_1 e C_2 de 28,7 e 0.0428, respectivamente.

Talaia e Amorim (2003) mostraram uma metodologia usada em coluna vertical de perspex para registrar a diferença de pressão para diferentes velocidade de gás injetado e observar visualmente o comportamento do leito fluidizado face ao caudal injetado na base da coluna. As partículas usadas registaram um diâmetro equivalente de $205\mu\text{m}$ (areia fina de acordo com a escala de Wentworth), fluidizados numa coluna de diâmetro interno de 100mm e aberta à atmosfera. As propriedades do ar foram $\rho_g = 1.2\text{kg.m}^{-3}$ e $\mu_g = 1.8\times 10^{-5}\text{Pa.s}$ e para as partículas $\rho_p = 2582\text{kg.m}^{-3}$, $\varepsilon = 0.494$ (leito fixo) e $\varepsilon_{mf} = 0.499$ (leito fluidizado nas condições críticas de suspensão das areias). A velocidade mínima de fluidização experimental para o leito de partículas registou um valor de $4,0\text{cm.s}^{-1}$.

Talaia (2003b) mostrou um excelente exemplo experimental da metodologia usada que permitiu prever a velocidade mínima de fluidização, confirmando as constantes da expressão (5). Na coluna vertical de aço usada por Talaia (2002a) foi usado o mesmo leito de areia (diâmetro médio das partículas $205\mu\text{m}$) com uma corrente de argon a 20°C até uma pressão de cerca de 100bar. Os sinais obtidos foram de transdutores diferenciais de pressão com uma frequência de aquisição de 100Hz.

Na Figura 4 é mostrado um exemplo completo dos sinais registados quando o leito de partículas é atravessado por uma corrente de gás. Devido à pressão de ensaio de 26,5bar a 20°C a densidade absoluta do gás tornou-se 44,8kg.m⁻³. A observação das imagens da Figura 4 mostra como o sinal da diferença de pressão (Pa) é influenciado com o aumento da corrente gasosa, mantendo a mesma pressão no interior da coluna ou seja no leito de areia. Para valores da corrente de gás acima de 3,04cm.s⁻¹ o sinal registado deixa de ser linear e mostra oscilações devido à passagem de bolhas de gás formadas pelo excesso de gás. É no instante que a linha da diferença de pressão deixa de ser uma linha reta e horizontal que se deve considerar o valor experimental da velocidade mínima de fluidização. A observação visual das imagens da Figura 4 mostra que até ao valor de 3,04cm.s⁻¹ a diferença de pressão entre duas tomas ligadas a um transdutor aumenta de valor face ao aumento do caudal de gás injetado. Após a condição da corrente gasosa compensar o peso do leito entre as duas tomas o excesso de gás faz um registo de oscilação de linha (caso da injeção de gás de 3,26cm.s⁻¹).

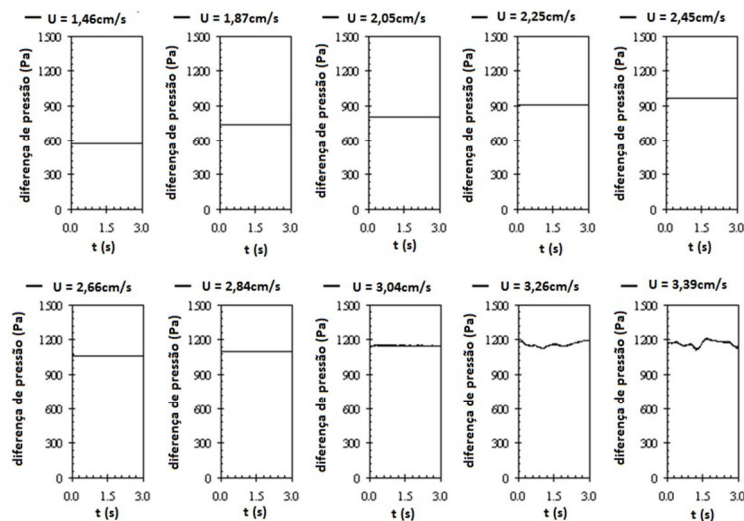


Fig. 4 - Exemplo do cálculo da velocidade mínima fluidização para um gás com 44,8kg/m³.

Nas experiências realizadas os sinais registados por transdutores acima do distribuidor da coluna permitiram calcular a densidade absoluta aparente do leito de partículas e observar a frequência de passagem de bolhas tubulares. O excesso de gás $U - u_{mf}$ foi determinado usando a expressão (16). A estabilidade das bolhas tubulares foi estudada aplicando o critério de Guedes de Carvalho (1981) dado por $(D^{1/2}\mu\rho) / [g^{1/2}d_p^2(\rho_p - \rho)] > (A/0,66)^4$.

Para $Ga > 3000$ o valor de A é 0,12 e as bolhas tubulares são estáveis se $(D^{1/2}\mu\rho) / [g^{1/2}d_p^2(\rho_p - \rho)] < 1,09 \times 10^{-3}$.

A velocidade mínima de fluidização foi prevista a partir da aplicação da expressão (5) reorganizada e dada por

$$u_{mf} = \frac{\mu_g}{\rho_o d_p} \frac{p_0}{p} \left[(C_1^2 + C_2 Ga)^{1/2} - C_1 \right] \quad (17)$$

onde C_1 e C_2 , de acordo com Talaia (2002a) tomam valores de 28,7 e 0,0428, respetivamente.

Numa visão adicional ao apresentado anteriormente, neste trabalho é apresentado um conjunto de novas experiências realizadas a uma pressão absoluta interna da coluna de 5bar. É usado, separadamente, um leito de partículas de ballotini de 200 μ m (experiências E, F, G e H) e um leito de partículas de ballotini de 490 μ m (experiências A, B, C e D). A corrente gasosa (foi usado ar comprimido) foi avaliada através do distribuidor instalado na base da coluna e confirmado por um rotâmetro que mediu a saída do ar para a atmosfera.

Na Figura 5 é ilustrada a montagem usada, em que TR_D representa o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão no distribuidor, TR_PL o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão numa parte do leito, TR_I o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão na posição inferior, TR_M o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão na posição média, TR_S o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão na posição superior, TR_L o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão no leito e TR_MC o transdutor diferencial que regista a diferença de pressão no medidor de caudal. Os transdutores estão ligados ao sistema gerado e montado para a aquisição de dados que é comandado pelo computador através de um programa elaborado para o efeito.

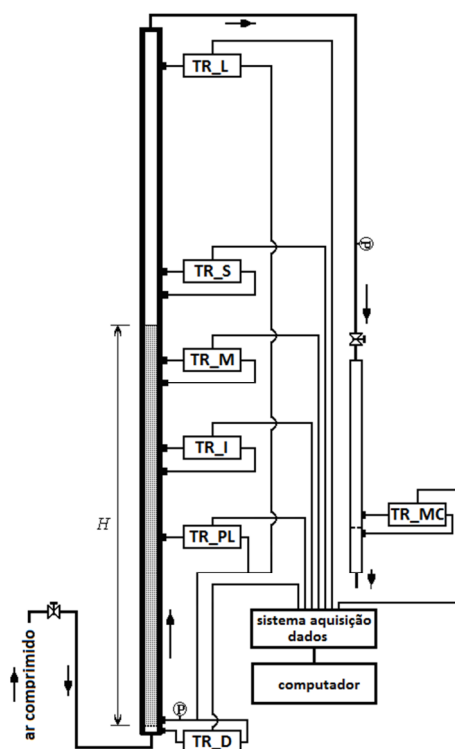


Fig. 5 - Ilustração da instalação experimental usada.

A Figura 6 mostra um conjunto de experiências para um leito de ballotini de 490 μ m. A coluna do lado esquerdo mostra para cada experiência de A a D e de cima para baixo os sinais registados por três transdutores diferenciais de pressão para uma diferença entre tomas de 10cm e por um transdutor diferencial de pressão para parte do leito, com uma toma imediatamente acima do distribuidor e outra a 103cm na altura do leito. Na Tabela 1 são indicados os valores medidos e registados quando se aumenta o caudal injetado na base da coluna. A coluna do lado direito da Figura 6 mostra os sinais correspondentes a cada

experiência e para o distribuidor (permite calcular a velocidade superficial do gás que atravessa o leito) e para o leito de partículas. A formação e passagem de bolhas tubulares estão bem reproduzidas pelos sinais registados.

Uma análise idêntica foi realizada para o leito de ballotini de 200µm, experiências de E a H.

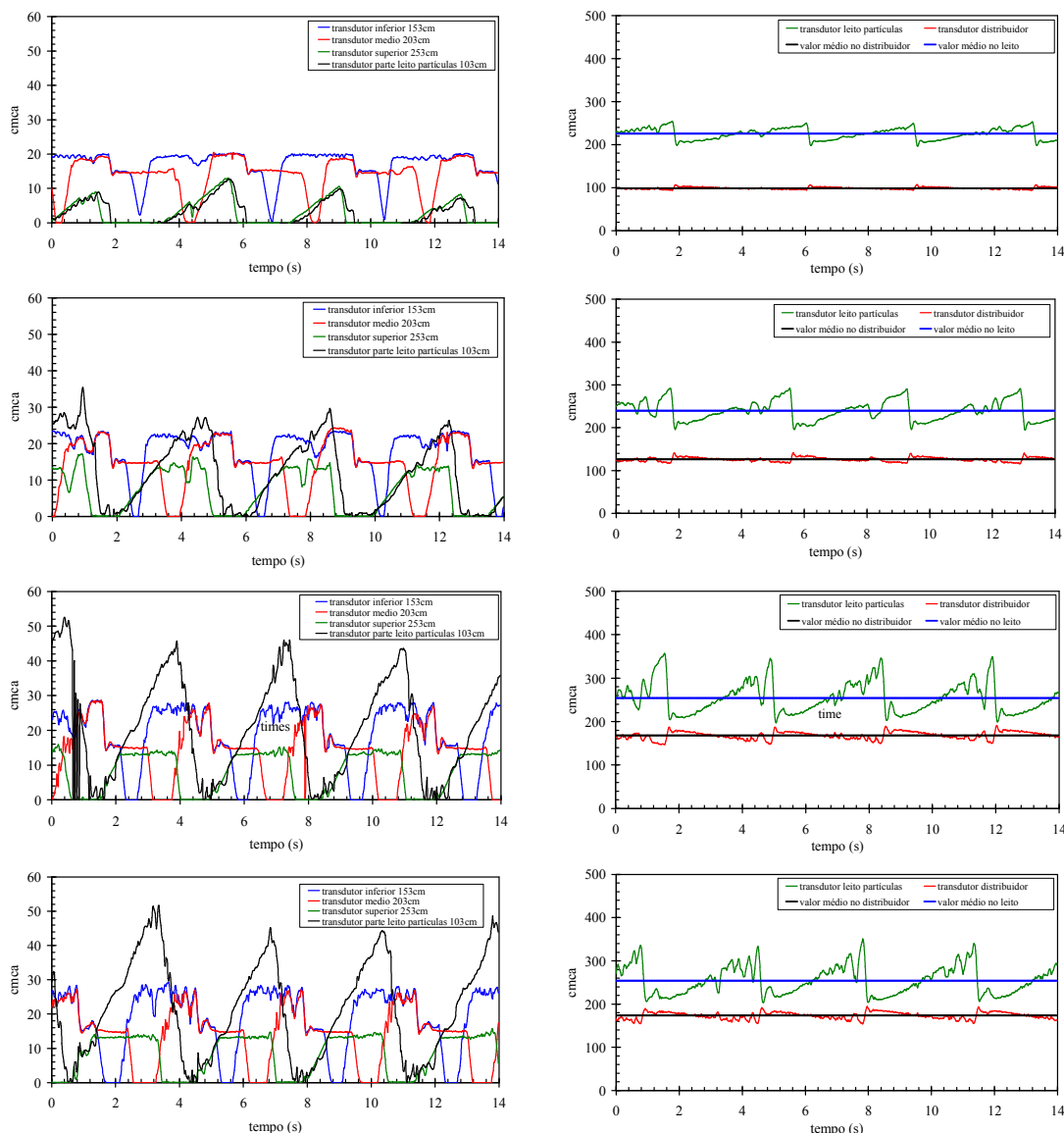


Fig. 6 - Ensaios experimentais para leito fluidizado a 5bar: Ballotini com 0,490mm diâmetro.

A Tabela 1 mostra para cada experiência e por coluna os seguintes dados: a massa de partículas colocada na coluna, o diâmetro médio das partículas, a velocidade mínima de fluidização, a existência de passagem de bolhas tubulares, a frequência do número de bolhas tubulares que passam pela toma a 153cm acima do distribuidor, a frequência do número de bolhas tubulares que passam pela toma a 203cm acima do distribuidor, a frequência do número de bolhas tubulares que passam pela toma a 253cm acima do distribuidor, a velocidade da bolha tubular, a diferença de pressão registada no distribuidor, o caudal de gás à pressão atmosférica, a velocidade superficial obtida a partir do distribuidor e o excesso de gás.

Tabela 1 - valores experimentais para dois diferentes leitos de partículas

	CGS	A	B	C	D	E	F	G	H
massa	g	9960	9960	9960	9960	10085	10085	10085	10085
diâm_partículas	cm	0.049	0.049	0.049	0.049	0.020	0.020	0.020	0.020
u_{mf}	cm/s	15.86	15.86	15.86	15.86	3.75	3.75	3.75	3.75
Bolhas tubulares	- - -	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
f_1 (153cm)	nº/s	4.0	4.0	4.0	4.5	6.0	6.0	7.0	6.0
f_2 (203cm)	nº/s	4.0	4.0	4.0	4.0	6.0	7.0	6.0	6.0
f_3 (253cm)	nº/s	4.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0
U bolha tubular	cm/s	41.76	43.27	56.91	56.48	69.63	72.68	74.11	70.31
distribuidor	cmca	98.8	126.1	168.2	173.4	21.9	34.3	55.0	63.8
Q_atmosfera	cm ³ /s	4450.5	4926.1	5688.2	5783.1	732.5	1625.6	2115.4	2768.0
U via distribuidor	cm/s	18.93	21.40	24.71	25.09	8.92	11.15	14.12	15.22
U - u_{mf}	cm/s	3.07	5.54	8.85	9.23	5.17	7.40	10.37	11.47

INVESTIGAÇÃO EM CURSO

Com base num número significativo de experiências realizadas para diferentes leitos fluidizados está em curso uma investigação que permitirá conhecer a influência da pressão na instabilidade de bolhas tubulares. Espera-se que uma teoria seja desenvolvida e publicada na literatura da especialidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram como a teoria de duas fases pode ser aplicada a um leito de partículas fluidizado de areias e de ballotini.

Os resultados obtidos mostraram que quando se mantém a velocidade da corrente gasosa no interior da coluna, dentro de certos limites experimentais, a estabilidade na interface gás sólido é influenciada quando experimentalmente se aumenta a pressão absoluta, medida no interior do leito.

Observou-se, também, que quando a pressão de ensaio aumenta, provoca um aumento da massa volúmica do gás o que equivale a um aumento da diferença de pressão registada, ou seja um conseqüente aumento da tensão de corte entre a corrente gasosa e as partículas.

Por último, é de concluir que as técnicas usadas são adequadas ao estudo dinâmico e transporte de partículas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece parte do suporte financeiro concedido pela FCT, o que significa que o trabalho foi, também, financiado por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/CED/00194/2013.

REFERÊNCIAS

- [1]-Penman, H.L., Natural evaporation from open water, soil and grass, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 193, pp. 120-145, 1948.
- [2]-Bagnold, R.A., The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Chapman and Hall, London, pp. 265, 1973.
- [3]-Babu, S.P., Shah, B. e Talwalkar, A., AIChE Symp. Ser., 74, pp. 176, 1978.
- [4]-Chitester *et al.*, Chem. Eng. Sc., 39, pp. 253, 1984.
- [5]-Davidson, J.F., Clift, R. e Harrison, D., Fluidization, Academic Press, pp. 723, 1985.
- [6]-Davidson, J.R. e Harrison, D., Fluidised Particles, Cambridge University Press, pp. 155, 1963.
- [7]-Davies, R.M. e Taylor, G.I., The mechanics of large bubbles rising through liquids in tubes, Proceedings of the Royal Society, London, 200 Ser. A, pp. 375-390, 1950.
- [8]-Dumitrescu, D.T., Stroemung an einer Luftblase im senkrechten Rohr, Zeitschrift Angewandter Mathematischer Mechanik, 23, pp. 139-149, 1943.
- [9]-Ergun, S., Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog., 48, pp. 89, 1952.
- [10]-Geldart, D., Gas Fluidization Tecnology, John and Sons, Ltd., 1986.
- [11]-Grace, J.R., in Handbook of Multiphase Systems, G. Hetsroni, ed., Hemisphere, Washington, D.C., 1982.
- [12]-Guedes de Carvalho, J., The Stability of Slugs in Fluidised Beds of Fine Particles: A Theory Based on Particle Pick-up From the Wake, Chemical Eng. Science, 36, pp. 1349-1356, 1981.
- [13]-Kunii, D. e Levenspiel, Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann series in chemical engineering, 2nd ed., 1991.
- [14]-Ogawa, A. e Beddow, J.K., Separation of Particles from Air and Gases, Vol 1, CRC Press, Inc., pp. 152, 1984.
- [15]-Richardson, J.F., in Fluidization, (Davidson, J.F. and Harrison, H., eds), pp. 25, Academic Press, New York, 1971.
- [16]-Saxena, S.C. e Vogel, G.J., Trans. Inst. Chem. Eng., 55, pp. 184, 1977; Chem. Eng. Journal, 14, pp. 59, 1977.
- [17]-Schiller, L. e Naumann, A., Z. Ver. Deut. Ing., 77, pp. 318, 1933.
- [18]-Stewart, P.S.B., Fluidisation: Some Hydrodynamics Studies, PhD Dissertation, Cambridge University, 1965.
- [19]-Talaia, M., Uma Análise Dimensional: Ascensão de uma Bolha num Líquido Parado, Gazeta de Física, Vol. 23, Fasc. 2, pp. 9-12, 2000.

[20]-Talaia, M., Incipient Fluidization: the Influence of the Pressure on the Minimum Fluidizing Velocity and Voidage Fraction, Paper Presented on the 2nd Annual European Multiphase Systems Institute meeting and 40th European Two-Phase Flow Group meeting, Stockholm, Sweden, Paper D-5, 3 pages, 2002a.

[21]-Talaia, M., Um Leito Fluidizado: Influência da Corrente Gasosa no Movimento de Partículas, Proceedings do 2º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG e 3º Encontro Luso-espanhol de Meteorologia, Évora, pp. 183-188, 2002b.

[22]-Talaia, M., Stability of an Interface Gas Solid of a Fluidised Bed at High Pressure, Proceedings of the 3ª Assembleia Luso - Espanhola de Geodesia e Geofísica, Vol. 3, Valencia, Espanha, pp. 1860-1863, 2003a.

[23]-Talaia, M., Experiments on an Incipient Fluidization: The Pressure Drop in Bed “versus” Gas Density, Proceedings of the 2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT 2003), CDROM, Editor J.P. Meyer, Victoria Falls - Livingstone, Zambia, Paper TM2, 5 pages, 2003b.

[24]-Talaia, M. e Amorim, A., The Measure of the Pressure Drop for Different Gas Velocities in Fluidized Bed, Proceedings of the 9th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Editors Stanislav Mares and Lubomil Pospisil, Prague, Czech Republic, Paper-064, 4 pages, 2003.

[25]-Talaia, M. e Talaia, P., Velocidade Superficial de um Leito de Partículas Baseada em Sinais Registados por Transdutor Diferencial de Pressão, XXVIII Reunión Bienal de la Real Sociedad Espanola de Física e 11º Encuentro Ibérico para la Ensenanza de la Física, Sevilla, Espanha, de 24 a 27 de Setembro, EIB-74, pp. 402-403, 2001.

[26]-Wen, C.Y. e Yu, Y.H, AIChEJ, 12, pp. 610, 1966.

[27]-White, E.T. e Beardmore, R.H., The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes, Chemical Engineering Science 17, pp. 351-361, 1962.