

# ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA ESTABILIDADE FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO OPERANDO COM MISTURA DE PARTÍCULAS

DYRNEY ARAÚJO DOS SANTOS<sup>1</sup>, CLÁUDIO ROBERTO DUARTE<sup>1</sup>, IRINEU  
PETRI JÚNIOR. <sup>1</sup>.

**RESUMO:** O leito de jorro tem sido usado na secagem, granulação, polimerização catalítica, dentre outros. A justificativa desta aplicação é atribuída ao excelente contato fluido-partícula e as características de circulação dos sólidos. Apesar de seu extenso potencial de aplicação (VIEIRA NETO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2011; AGUADO *et al.*, 2000; BARROZO *et al.*, 2008), este equipamento possui algumas limitações devido ao fato de, quando projetado em escala industrial, poder apresentar um regime de instabilidade, o que leva a uma diminuição da sua eficiência. Misturas de partículas tem sido utilizadas, por vários pesquisadores, na tentativa de amenizar ou mesmo eliminar as faixas operacionais onde estas instabilidades se encontram. Um dos problemas, hoje encontrado, é a de identificação, através de técnicas estatísticas, da região de jorro instável o que seria de suma importância industrial visto que, nem sempre em um equipamento em escala industrial será possível a abertura do mesmo para a visualização da operação. Neste trabalho foram obtidos perfis experimentais de velocidade de sólidos utilizando-se uma câmera de alta precisão (2000 frames/s) a uma determinada altura do leito em relação à base do mesmo variando-se o tamanho e a quantidade das partículas para verificar a influência de mistura de partículas na fluidodinâmica do leito de jorro – neste caso utilizou-se um meio leito contendo uma parede frontal de vidro para uma melhor visualização das partículas. Após este, realizou-se simulações valendo-se da técnica de fluidodinâmica computacional utilizando-se o modelo Euleriano Multifásico Granular, o qual trata tanto a fase gás quanto a fase sólidos como sendo contínuas e interpenetrantes, afim de comparação. Foram utilizados, também, dados experimentais e estatísticos de desvio padrão dos sinais de queda de pressão no leito versus velocidade de operação (Bacelos 2006), que tiveram como intuito a identificação das regiões de leito fixo, de jorro estável e jorro instável, os quais são de grande importância para o projeto do equipamento em questão, para posterior comparação com os resultados simulados realizados em uma malha 3D, 2D com eixo axial e 2D sem eixo axial.

**Palavra chave:** leito de jorro, CFD, instabilidade, mistura de partículas.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Avenida João Naves de Ávila 2121, Uberlândia, CEP:38400-902, dyrneq@yahoo.com.br

**ABSTRACT:** The spouted bed has been used in drying, granulation, catalytic polymerization, among others. The justification of this application is attributed to the excellent fluid-particle contact and characteristics of movement of solids. Despite their potential for extensive application, this equipment has some limitations due to the fact that, when projected on an industrial scale to make a regime of instability, which leads to a decrease in their efficiency. Mixtures of particles have been used by several researchers in an attempt to alleviate or even eliminate the operational ranges where these instabilities are. One of the problems, now found, is to identify, through statistical techniques, the unstable region of the outflow would be of great industrial importance since, and not always in an industrial-scale equipment will be possible to open the same view for the operation. In this work were obtained from experimental velocity profiles of solids using a high-precision camera (2000 frames / s) at a given height of the bed at the base of the range is the size and quantity of particles to check the influence of mixture of particles in its fluid-dynamics - in this case used a medium containing a bed front wall of glass for better viewing of the particles. After this, there was worth simulations is the technique of computational fluid-dynamics using the Granular multiphase model Euleriano, which treats both the gas phase as the solid phase as continuous and interpenetrating, to compare. Were used, also, experimental data and statistical standard deviation of the signs of fall in pressure in the bed versus speed of operation (rooted 2006), which had the aim to identify regions of fixed bed of gush gush unstable and stable, which are of great importance for the design of the equipment in question, for later comparison with the results achieved in a simulated 3D mesh, 2D with axial shaft and 2D without axial axis.

**Key-words:** spouted bed, CFD, unstable, particles mixture.

## 1- INTRODUÇÃO

Os sistemas gás-sólido mais comuns podem ser classificados como não agitados, agitados mecanicamente e agitados por gás.

Os leitos fixos (não agitados) são aplicáveis a processos que não necessitam de alta taxa de transferência de calor e massa entre o gás e os sólidos, e nos quais a uniformidade de condições em partes diferentes do leito não é tão desejável. Sua aplicação se estende então ao tratamento de sólidos e processos de calcinação, secagem dentre outros.

Uma agitação limitada pode ser dada aos sólidos por meios mecânicos pelo uso de agitadores internos. Em qualquer caso, a maioria do material é mantida ainda em uma condição de leito acumulado. O sistema mecânico é usado principalmente para processos que envolvem tratamento de sólidos, como secagem e resfriamento, mas é obviamente indesejável para processos que requerem tratamento uniforme do gás.

Em sistemas com agitação com gás, como leito fluidizado e leito de jorro, uma forma de agitação mais intensa é dada para cada partícula sólida pela ação da corrente de gás, que é alimentada na base do leito.

O leito de jorro foi concebido originalmente e até o momento tem sido considerado como uma versão modificada de um leito fluidizado, devido à qualidade pobre de fluidização encontrada com partículas maiores. Assim, alguns livros caracterizaram o leito de jorro simplesmente como um tipo especial de leito fluidizado. Esta visão não é muito adequada, já que no seu desenvolvimento, o leito de jorro tem exibido características particulares que o faz capaz de executar certas operações que exigem movimento cíclico mais homogêneo das partículas, que não podem ser executadas em um leito fluidizado devido a seu movimento de partículas comparativamente aleatório.

A Figura 1 apresenta o esquema do leito de jorro com suas regiões características. O movimento cíclico e homogêneo das partículas no interior da coluna, propriedade particular da técnica de leito de jorro, proporciona um bom contato fluido-partícula, garantindo altos coeficientes convectivos de transferência de calor e de massa entre as fases.

A base cônica é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. O ar em alta velocidade é adicionado a este conjunto pela base inferior do tronco de cone, permeando entre as partículas. A intensa circulação destas partículas começa quando a vazão do ar é suficiente para promover o transporte pneumático das mesmas na região central do leito. Ao atingirem a região da fonte as partículas perdem

totalmente sua energia cinética, caindo posteriormente na região anular e aí fazem um movimento descendente até regiões inferiores do leito. Nota-se assim que as partículas possuem um movimento cíclico bastante definido, o que o torna mais atrativo para operações de revestimento (comprimidos, cápsulas gelatinosas, peletização, inoculação de sementes, etc.), dada a homogeneidade do revestimento obtido, quando comparado com outros equipamentos (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

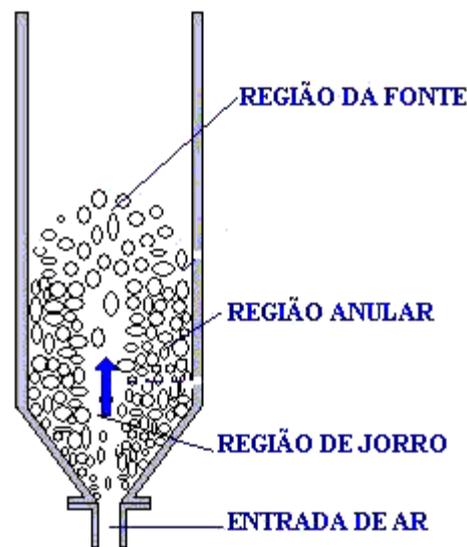


Figura 1 – O leito de jorro com suas regiões características.

Apesar da larga aplicação deste equipamento (VIEIRA NETO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2011; AGUADO *et al.*, 2000; BARROZO *et al.*, 2008), o seu uso ainda é restrito aos processos operados em pequenas escalas, devido à limitação de “scale-up”. O aumento de escala, via de regra, provoca instabilidades no leito, o que impede a sua utilização em muitos processos industriais. Neste sentido, uma rota importante de estudo é identificar mecanismos, que tornem possível o uso deste equipamento em processos industriais sem sofrer o efeito da instabilidade do leito. Acredita-se que o uso de uma mistura de partículas finas inertes possa evitar a instabilidade indesejada. Para leitos de jorro cilíndricos de base cônica compostos de inertes de tamanho uniforme (monopartículas), XU *et al.* (2004) propuseram uma análise estatística da flutuação da pressão para identificar regimes de jorro estáveis e instáveis. Esta técnica baseia-se na análise das diferentes tendências das curvas do desvio padrão e da assimetria da flutuação do sinal de queda de pressão total no leito em função da velocidade do ar. A técnica de estudo da fluidodinâmica do leito de jorro poderá ser aplicada à mistura de partículas para avaliar o efeito da mistura na estabilidade e aumento de escala, visando uma aplicação ainda maior deste equipamento na indústria.

Para isso é necessário entender o mecanismo de escoamento do gás e a distribuição de perfis de velocidade das partículas em seu interior. Além disso, avaliar a distribuição de fração de volume de sólidos e de forças ao longo do leito. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta bastante útil e capaz de auxiliar no estudo de escoamento de sistemas multifásico como o leito de jorro, conforme estudos apresentados na literatura (DU *et al.*, 2006; LU *et al.*, 2001 e 2004; TAGHIPOUR *et al.*, 2003; KAWAGUCHI *et al.*, 2000; KONDURI *et al.*, 1999; KRZYWANSKI *et al.*, 1992).

Alguns estudiosos do leito de jorro (HE *et al.*, 1994; OLAZAR *et al.*, 2001-2006, etc. ) têm-se dedicado ao desenvolvimento de modelos matemáticos, semi-empíricos com validação ou verificação experimental, que permitam obter informações detalhadas sobre os perfis fluidodinâmicos deste equipamento, o que é de grande importância para o entendimento do escoamento do gás e das partículas durante o processo de revestimento e secagem. DUARTE *et al.* (2005) e WEI *et al.* (2006) mostraram que é possível descrever a fluidodinâmica das partículas e do gás no interior de um leito de jorro usando uma Modelagem Euleriana Granular Multifásica (MEGM) implementada no pacote computacional de CFD FLUENT.

Estas informações a cerca da fluidodinâmica das fases contínua e dispersa representam um importante passo no desenvolvimento de geometrias ótimas deste equipamento para operação de secagem e revestimento de partículas em escala industrial. Como supramencionado, a fluidodinâmica computacional (CFD) pode auxiliar neste tipo de estudo, ao passo que, a previsão das condições de estabilidade do leito em grandes escalas é o principal agente limitador desta técnica.

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) consiste na solução das equações gerais de transporte empregando métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos, possibilitando avaliar o transporte de uma determinada propriedade.

## **2-MATERIAIS E MÉTODOS**

### ***2.1-Metodologia Numérica***

A geração de malha é citada frequentemente como a parte mais importante e que consome um maior tempo na análise de CFD. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise, independente do tipo de resolvidor de fluxo usado. Adicionalmente, os códigos CFD serão mais robustos e eficientes ao usar uma malha bem construída.

Neste trabalho, a malha computacional foi obtida utilizando o “software” de construção de malha GAMBIT<sup>®</sup>. Este “software” disponibiliza uma interface com o “software” de fluidodinâmica computacional FLUENT<sup>®</sup> e representa uma importante ferramenta que oferece vários recursos, os quais permitem a elaboração de malhas, desde configurações simples até modelos altamente sofisticados. Basicamente, as etapas de construção da malha seguem a sequência abaixo relacionada:

- Construção da geometria do equipamento;
- Definição das faces e/ou volumes;
- Determinação de efeitos como camada limite, ou outro tipo de refinamento desejado;
- Aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetraédrica, hexaédrica ou híbrida);
- Definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
- Determinação das fases que compõem o interior do equipamento, por exemplo, fluido (ar) e/ou sólido (sementes de soja, esfera de vidro, etc.);
- Conversão do arquivo contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo software.

Uma vez lido o arquivo, são definidas as condições de contorno e iniciais, os modelos e os tipos de algoritmos de solução numérica a serem adotados. Para tanto, adotando as etapas supramencionadas para a criação de malhas foram confeccionadas malhas em 3D de um meio leito de jorro, 3D de um leito de jorro completo e em 2D de um leito de jorro também completo mostradas nas figuras abaixo.

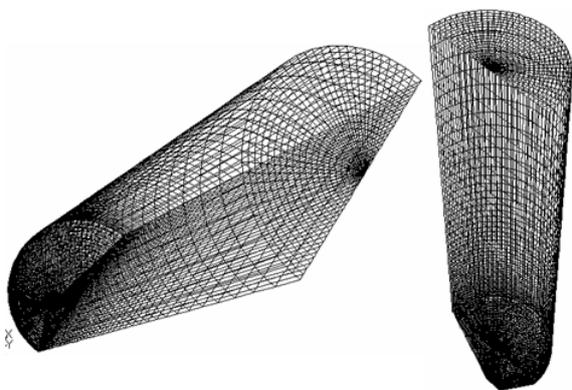


Figura 2 – Malha de um meio leito de jorro em 3D.

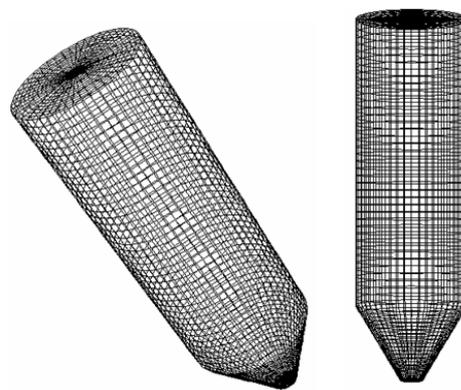


Figura 3 – Malha de um leito de jorro completo em 3D.

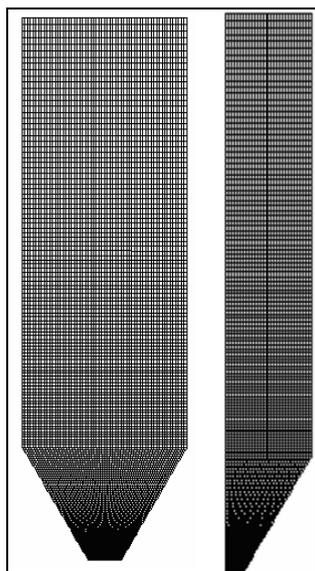


Figura 4 – Malha de um leito de jorro completo em 2D.

As dimensões utilizadas para a confecção da malha mostrada na Figuras 2 são: raio do orifício de entrada de 1,75 cm, raio da região cilíndrica de 10,5 cm, altura da parte cônica de 15 cm e altura da parte cilíndrica de 85 cm e ângulo de inclinação da região cônica de  $40^\circ$ . Já em relação às Figuras 3 e 4, as dimensões utilizadas foram: raio menor do orifício de entrada de 2,5 cm, raio maior do orifício de entrada de 3,0 cm, raio da região cilíndrica de 15 cm e ângulo de inclinação da região cônica de  $60^\circ$ .

Uma vez obtidas as diferentes configurações de malhas aqui propostas e apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4, o passo seguinte foi usar estas malhas no estudo de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro, empregando a técnica de fluidodinâmica computacional. Para isso, foi empregado o modelo Euleriano Granular Multifásico, que é apresentado a seguir.

#### *Desenvolvimento do Modelo Granular Euleriano Multifásico*

Conforme descrito por DUARTE *et al.* (2005), o modelo Granular Euleriano Multifásico mostrou-se adequado para simulação de fluidodinâmica em leito de jorro. Neste item, é descrito o referido modelo com as equações conservativas e constitutivas pertinentes.

Para o modelo Euleriano Granular Multifásico as fases gasosas e sólidas são tratadas como mutuamente interpenetradas, fazendo-se necessário o uso do conceito de fração de volume para cada uma das fases envolvidas. As leis de conservação de massa e momentum devem ser satisfeitas para cada fase individualmente. Sendo assim, a descrição do fluxo

multifásico incorpora as frações volumétricas de cada fase, denotadas aqui como  $\alpha_y$  (O termo  $y$  aqui expresso representa tanto a fase fluida,  $q$ , quanto a fase sólida,  $p$ ). A obtenção da equação de conservação pode ser feita pelo agrupamento médio do balanço local instantâneo para cada uma das fases ou pelo uso da teoria de mistura.

O volume da fase  $y$ ,  $V_y$ , é definido por:

$$V_y = \int_V \alpha_y dV \quad (1)$$

sendo:

$$\sum_{y=1}^n \alpha_y = 1 \quad (2)$$

A densidade efetiva da fase  $y$  é:

$$\bar{\rho}_y = \alpha_y \rho_y \quad (3)$$

sendo  $\rho_y$  é a densidade da fase  $y$ .

*Equação da continuidade para a fase fluida  $q$ :*

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla g (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (4)$$

*Equação da continuidade para a fase sólida  $p$ :*

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla g (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{q=1}^n \dot{m}_{qp} \quad (5)$$

sendo  $\vec{v}_q$  e  $\vec{v}_p$  são as velocidades das fase  $q$  e  $p$ , respectivamente.

O termo  $\dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp}$  caracteriza a transferência de massa da  $p^{\text{ésima}}$  para  $q^{\text{ésima}}$  fase e  $(n)$  o número de fases (no caso de leito de jorro duas fases, uma fluida e uma particulada). No trabalho proposto será considerado nulo o termo do lado direito das Equações (4 e 5), ou seja, será considerada nula a transferência de massa entres as fases.

Em um primeiro momento é importante ressaltar que os modelos do tipo Euler-Euler, como é o caso do modelo Granular Euleriano Multifásico, considera a fase fluida contínua e a fase sólida como dispersa. A fase contínua é dita primária e a dispersa secundária. Nas equações a seguir, a notação  $q$  refere-se a fase primária, enquanto  $p$  a secundária. Portanto, será considerada a fase sólida como fase secundária ( $p$ ) e a fase gasosa como primária ( $q$ ).

*Balanço de momento para a fase fluida*

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \\ -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \\ + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_{co} + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \end{aligned} \quad (6)$$

*Balanço de momento para a fase sólida p:*

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p) = -\rho_p \nabla p - \nabla p_s + \\ + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_p + \alpha_p \rho_p (F_{co} + F_{lift,p} + F_{vm,p}) + \sum_{j=1}^N K_{qp} (\vec{v}_q - \vec{v}_p) + \\ + \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \end{aligned} \quad (7)$$

Sendo que:  $F_{co}$  é a força externa do corpo,  $F_{lift}$  é a força de ascensão,  $F_{vm}$  é a força de massa virtual,  $R_{pq}$  é a força de interação entre as fases e  $p$  é a pressão distribuída em todas as fases.

O termo  $\bar{\bar{\tau}}_q$  da Equação (6) representa o tensor de deformação da fase fluida  $q$ .

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left( \lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{\bar{I}} \quad (8)$$

Aqui  $\mu_q$  e  $\lambda_q$  são as viscosidades de cisalhamento e *bulk* da fase  $q$ , respectivamente. A Equação (6) deve considerar para o cálculo da força na interface ( $R_{pq}$ ), características do leito, tais como: diferentes valores de porosidade em regiões distintas do leito, tipo de atrito, pressão, coesão e outros efeitos, estando sujeita a seguinte condição:  $R_{pq} = -R_{qp}$  e  $R_{pq} = 0$ .

O termo de interação entre as fases é expresso pela Equação (9):

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad (9)$$

sendo  $K_{pq} = K_{qp}$  é o coeficiente de troca de momento na interface.

### *Modelos de arraste*

A troca de momento entre as fases é baseada no coeficiente de troca fluido-sólido  $K_{qp}$ . Como mencionado anteriormente, o leito de jorro deve ser modelado como um sistema bifásico, com uma fase fluida (ar) e outra sólida (partículas). Para esta situação o coeficiente de troca sólido- fluido  $K_{pq}$  pode ser escrito da seguinte forma geral:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (12)$$

Sendo  $f$  é definido de forma distinta para os diferentes modelos de coeficiente de troca (como descrito na seqüência), e  $\tau_p$ , o tempo de relaxação da partícula, é definido como:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (13)$$

sendo  $d_p$  é o diâmetro das partículas (fase sólida).

Todas as definições de  $f$  incluem o coeficiente de arraste ( $C_D$ ) que é baseada no número de Reynolds relativo ( $Re_s$ ). Este coeficiente de arraste difere entre os modelos de coeficientes de troca disponíveis na literatura, o modelo de Gidaspow (1992) será adotado no presente trabalho.

A aplicação da teoria de fluxos granulares deve ser aplicada à modelagem do leito de jorro, sendo esta apresentada a seguir.

### *Equações de Fluxo Granular e Teoria Cinética*

Um modelo multi-fluido granular é adotado para descrever o comportamento do fluxo em uma mistura fluido-sólido. As tensões da fase sólida são obtidas por analogia entre o movimento aleatório das partículas, devido às colisões entre as mesmas, e o movimento de moléculas de gás, levando em conta a não elasticidade da fase granular. A energia cinética associada às flutuações da velocidade da partícula é representada pela temperatura granular que é proporcional à metade do quadrado da velocidade das partículas.

### *Pressão de Sólidos*

Para fluxos granulares em regime compressível (i.e., quando a fração volumétrica de sólidos é menor que o máximo valor permitido em torno de 0,63), a pressão de sólidos é calculada e usada para o termo gradiente de pressão,  $\nabla p_s$ , na equação de momento para fase granular. Como existe uma distribuição de velocidade para as partículas, um parâmetro denominado de temperatura granular é introduzido ao modelo, e aparece na expressão para pressão de sólidos e viscosidades.

A pressão de sólidos é composta de um termo cinético e um segundo termo para colisões entre partículas:

$$p_s = \alpha_p \rho_p \theta_s + 2\rho_p (1 + e_{ss}) \alpha_p^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (14)$$

sendo  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição para colisões entre partículas,  $g_{0,ss}$  é a função de distribuição radial, e  $\theta_s$  é a temperatura granular.

Neste trabalho será adotado um valor de 0,9 para  $e_{ss}$ , o qual é usualmente encontrado na literatura, mas o valor pode ser ajustado para se adaptar a um determinado tipo de partícula. A temperatura granular,  $\theta_s$ , é proporcional à energia cinética da partícula, e será descrita nesta seção. A função  $g_{0,ss}$  é uma função de distribuição que governa a transição da condição de compressibilidade ( $\alpha < \alpha_{p,max}$ ) onde o espaço entre as partículas sólidas pode continuar a diminuir, para a condição de incompressibilidade com  $\alpha = \alpha_{p,max}$ , onde não pode ocorrer mais diminuição nessa variável.

### *Temperatura Granular*

Assim como para gases tem-se a temperatura termodinâmica, pode se introduzir o conceito de temperatura granular ( $\theta_s$ ) para sistemas particulados como uma medida da flutuação da velocidade das partículas.

$$\theta_s = \frac{1}{3} (v_p^2) \quad (15)$$

A temperatura granular para a fase sólida é proporcional a energia cinética do movimento aleatório das partículas. A equação do transporte obtida da teoria cinética tem a forma:

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_p \alpha_p \theta_s) + \nabla \square (\rho_p \alpha_p \vec{v}_p \theta_s) \right] = \left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau} \right) : \nabla \vec{v}_p + \nabla \square (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{qp} \quad (16)$$

sendo:

$\left( -p_s \bar{I} + \bar{\tau} \right) : \nabla \vec{v}_p$  = geração de energia pelo tensor de tensão de sólido

$k_{\theta_s} \nabla \theta_s$  = energia de difusão ( $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão)

$\gamma_{\theta_s}$  = energia de dissipação devido à colisão

$\phi_{qp}$  = troca de energia entre a fase fluida e a fase sólida.

## 2.2-METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A Figura 5 ilustra a unidade experimental disponível no laboratório de sistemas particulados da FEQUI/UFU para o desenvolvimento deste trabalho.

Sendo:

(1) Um compressor centrífugo da marca Ibram com 7,5 cv, 3500 rpm e 60 Hz que impulsiona o ar para o sistema;

(2) Duas válvulas tipo gaveta. Uma válvula primária instalada após a saída do compressor em um sistema de *bypass* para regular a vazão de ar e outra, secundária, instalada na linha de admissão de ar ao leito, para um maior controle sobre a vazão do fluido;

(3) Tubulação de aço galvanizado com 50,8mm de diâmetro e, aproximadamente, 3000 mm de comprimento, uma curva em 90°, uma luva de união e uma conexão T, todos em aço galvanizado de 2”;

(4) Um leito de jorro do tipo cone-cilíndrico, construído em aço inoxidável, com visor (ao longo da parte cilíndrica) que permite observar o andamento dos experimentos.

(5) Um termoanemômetro da marca VelociCalc TSI, modelo 8357 com faixa de operação de 0 à 25 m/s, instalado para a coleta dos dados de velocidade e temperatura do ar na linha;

(6) Sistema de aquisição de dados que é composto por:

(6.1) Um transdutor de pressão da marca *DRUCK INCORPORATED* - PTX500, com faixa de escala de 0 a 1 psig, instalado na base cônica do leito, logo acima da entrada de ar;

(6.2) O bloco conector marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – CB-68LP, faz a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor de pressão e a placa de aquisição de dados A/D (analógico-digital).

(6.3) A placa de aquisição de dados marca *NATIONAL INSTRUMENTS* – PCI-6021E com 16 entradas analógicas converte os sinais do transdutor de pressão para a forma digital.

(6.4) Os sinais digitais serão processados e analisados num microcomputador, com o auxílio do *software* LabVIEW™, versão 7.1, escolhido para ajustar a frequência de coleta do sinal de pressão no leito.

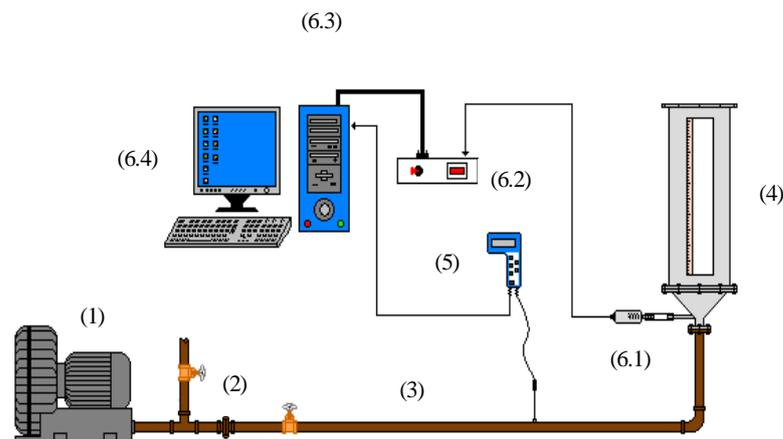


Figura 5 – Esquema da unidade experimental

A unidade experimental destacada na Figura 5 está à disposição no laboratório de sistemas particulados da FEQUI/UFU.

### 3-RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme previsto nos tópicos anteriores, no primeiro momento foram obtidos experimentalmente perfis de velocidade de sólidos ao longo da direção radial do leito de jorro

utilizando-se monopartículas e misturas de partículas. O passo seguinte foi a realização de simulações, nas mesmas condições, para avaliar o efeito da mistura de partículas na previsão, através da técnica de fluidodinâmica computacional, da variável analisada utilizando-se a malha mostrada na Figura 2. As monopartículas utilizadas, tanto experimentais quanto na simulação, foram esferas de vidro de diâmetro de 0,00335 m e, as condições operacionais foram: altura de leito estático de 14,7 cm em relação á base do leito, vazão de ar no orifício de entrada de 0,0232 m<sup>3</sup>/s. A coleta de dados, utilizando uma câmera de alta precisão, foram tomados a um distância de 12 cm da base do leito. Foram realizadas duas simulações diferentes para as mesmas monopartículas considerando-se, na primeira, duas fases, ou seja, sólidos e ar, sendo esta considerando o efeito de interação sólido-ar. Para a segunda simulação a fase sólida foi dividida em duas fases, sendo as duas constituídas das mesmas partículas, e considerou-se a presença da fase ar como anteriormente. Sendo assim, nesta, teremos os efeitos de interação sólido1-ar, sólido2-ar e sólido1-sólido2 contendo modelos de interação de fases diferentes dos anteriores. Estas simulações são mostradas nas Figuras 6 e 7 respectivamente.

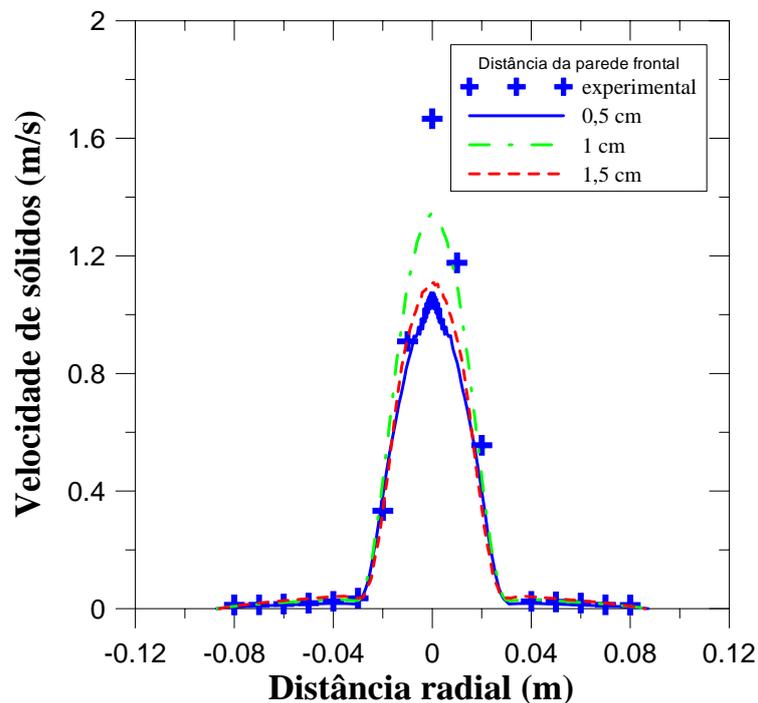


Figura 6 – Perfis de velocidade de sólidos experimentais e simulados a uma altura de 12 cm da base do leito para a monopartícula considerando-se apenas duas fases.

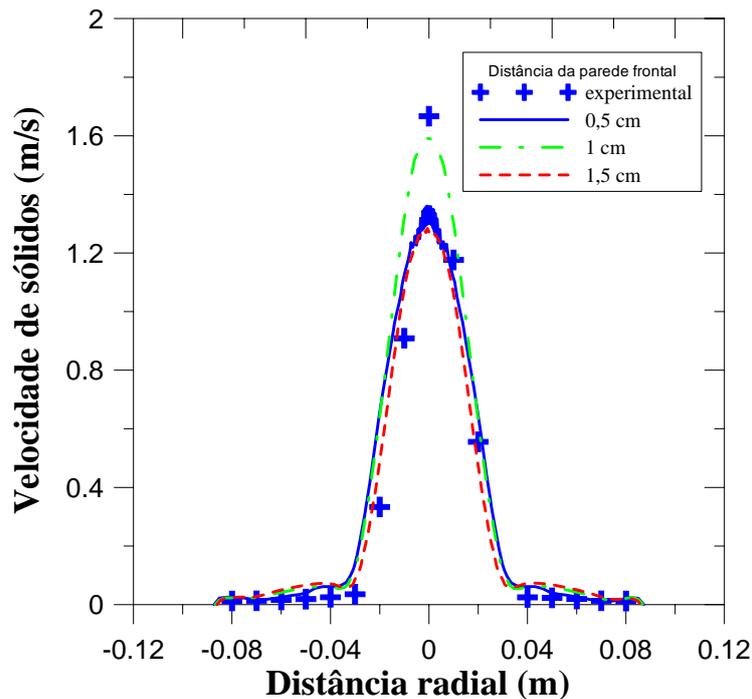


Figura 7 – Perfis de velocidade de sólidos experimentais e simulados a uma altura de 12 cm da base do leito para as monopartículas considerando-se três fases.

As Figura 6 e 7 acima nos mostram os perfis de velocidade de sólidos ao longo da posição radial e a vários valores de profundidade sendo que, as linhas contínuas e descontínuas representam os resultados simulados e as cruzes representam os dados experimentais, ambos a 12cm da base do leito. Pôde-se notar que, à medida que aumentamos a profundidade, no caso das simulações, partindo-se da parede frontal, as velocidades tendem a aumentar passando por um máximo a uma profundidade de aproximadamente 1 cm. Este fato indica que deve-se ter o cuidado de, na obtenção de dados de velocidade de partículas, estar ciente em relação à distância que as mesmas se encontram da parede frontal, evitando-se, assim, conclusões erradas.

Verifica-se, também, que os menores picos de velocidade simulados, na região central (região de jorro), encontraram-se próximos da parede frontal e da parede do fundo do leito o que já era esperado em virtude do “efeito de parede”. A Figura 6 mostra uma maior discrepância entre o experimental e o simulado a uma distância da parede frontal de 1 cm (a melhor aproximação observada) quando comparado aos perfis da Figura 7. Isso mostra que os modelos de interação utilizados quando levamos em consideração a divisão da fase sólida em duas fases, admitindo os efeitos sólido1-sólido2, se mostraram mais adequados para a simulação. Houve uma boa concordância entre o perfil experimental e os simulados, para todas as distâncias da parede frontal, na região anular (região de menor porosidade). Já na

região de jorro (região de maior porosidade) observou-se que o perfil de velocidade de sólidos simulado a uma distância de 1cm da parede frontal foi o que mais se aproximou do experimental. As misturas de partículas utilizadas para avaliação foram divididas em duas configurações. A configuração 1 foi composta de esferas de vidro contendo 50% de esferas de diâmetro de 0,004 m e 50% de esferas de diâmetro de 0,00283 m.

Já a configuração 2 foi composta de esferas de vidro contendo 80% de esferas de diâmetro de 0,00335m e 20% de esferas de diâmetro de 0,004 m. Todos os experimentos e simulações foram realizados a uma altura da base do leito de 12 cm, com altura de leito estático de 14,7cm e vazão de ar no orifício de entrada do leito de 0,0223 m<sup>3</sup>/s. As Figuras 8 e 9 abaixo mostram os resultados experimentais e simulados para as esferas de configuração 1 e configuração 2 respectivamente.

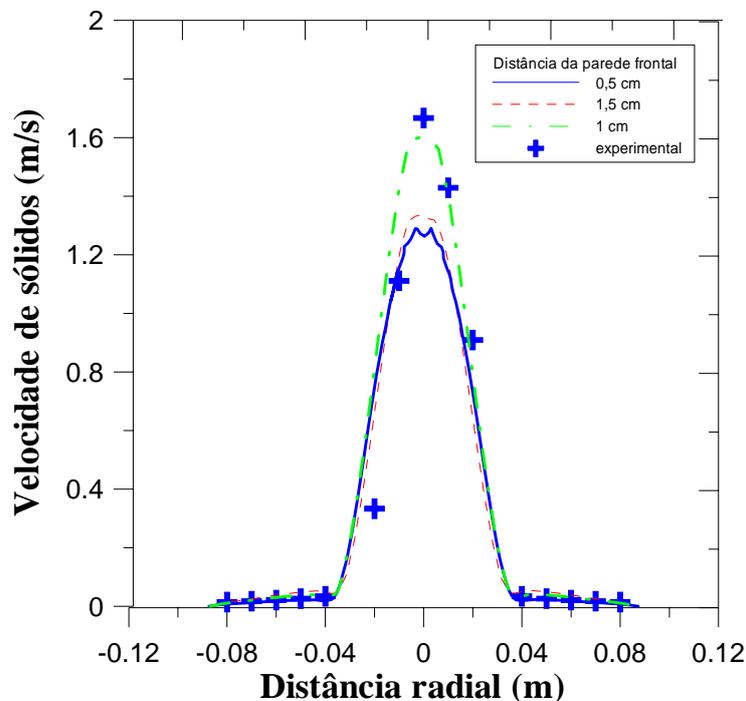


Figura 8 – Perfis de velocidade de sólidos experimentais e simulados a uma altura de 12 cm da base do leito para a configuração 1.

A mesma avaliação feita com o perfil de velocidade de sólidos realizado com monopartículas pôde ser feito com as misturas de partículas, notando-se, a partir da Figura 8, que o perfil de velocidade de sólidos simulado que mais se aproximou do experimental foi o realizado a uma distância de 1 cm da parede frontal, fato este que foi notado, também, com monopartículas. Já na Figura 9 observam-se desvios entre os perfis simulados e o experimental apenas em relação aos picos de velocidade os quais se encontram na região de

jorro. No presente trabalho, como explanado anteriormente, procurou-se, também, reproduzir através de simulações, os dados experimentais de desvio padrão dos sinais de queda de pressão versus velocidade de ar na entrada do leito (Bacelos 2006), de suma importância na caracterização das regiões de leito fixo, jorro estável e jorro instável. Para tanto, foram utilizadas esferas de vidro de diâmetros de 1,29 mm, 2,18 mm e 3,675 mm, com densidade de 2490 Kg/m<sup>3</sup>.

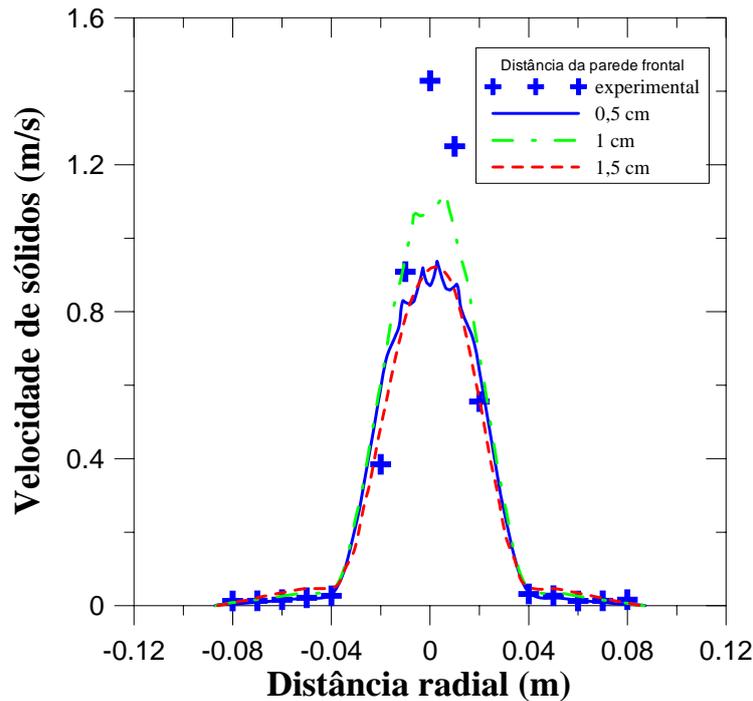


Figura 9 – Perfis de velocidade de sólidos experimentais e simulados a uma altura de 12cm da base do leito para a configuração 2.

Realizaram-se simulações em 3D, cuja malha encontra-se ilustrada conforme a Figura 3, e em 2D (com eixo axial e sem eixo axial), cuja malha encontra-se ilustrada na Figura 4, para caracterizar qual tipo de simulação (em 3D, em 2D com eixo axial ou 2D sem eixo axial) seria a mais indicada para a previsão da instabilidade em um leito de jorro. Para cada condição experimental foi simulado um tempo de 15 segundos. A partir destes dados, analisou-se, também, a influência do tempo de simulação, coletando-se resultados dos últimos 12 segundos de simulação assim como dos últimos 8 segundos e 4 segundos. As figuras abaixo mostram os resultados experimentais (BACELOS, 2006) e simulados em 3D para esferas de diâmetro de 1,29 mm, 2,18 mm e 3,675 mm.

Pôde-se observar que o desvio padrão da flutuação do sinal de queda de pressão total no leito varia com a variação da velocidade do ar. Isto significa que há um aumento da

complexidade da dinâmica do escoamento ar-sólido com o aumento da velocidade do ar. A Figura 10 mostra que o regime de jorro instável é caracterizado por um aumento monotônico do desvio padrão quando a velocidade do ar é superior à velocidade de mínimo jorro. Apenas para o tamanho de partícula de 1,29mm foi possível a identificação do regime de jorro instável experimental (BACELOS, 2006). Verificou-se, através dos resultados, que há uma grande concordância qualitativa entre os dados experimentais (BACELOS, 2006) e os simulados.

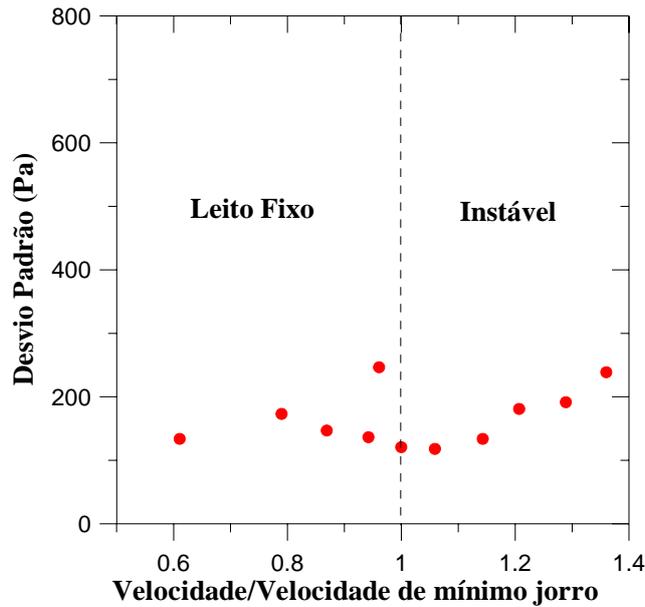


Figura 10 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 1,29 mm.

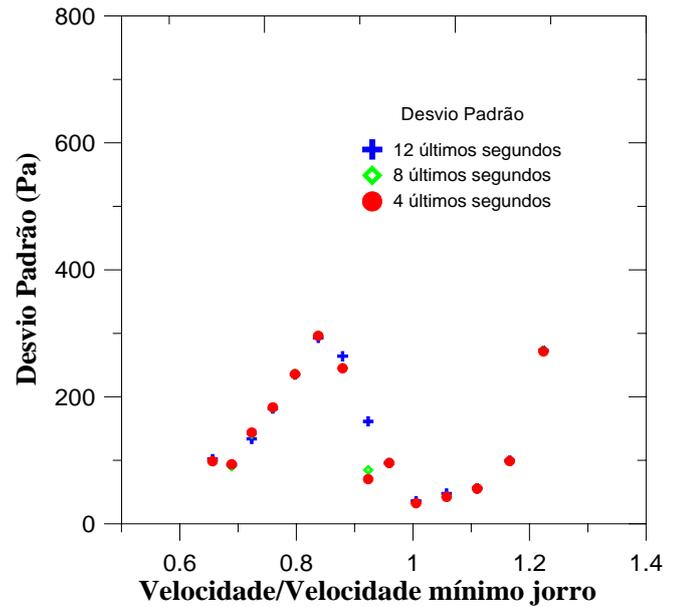


Figura 11 – Simulação em 3D para esferas de 1,29 mm.

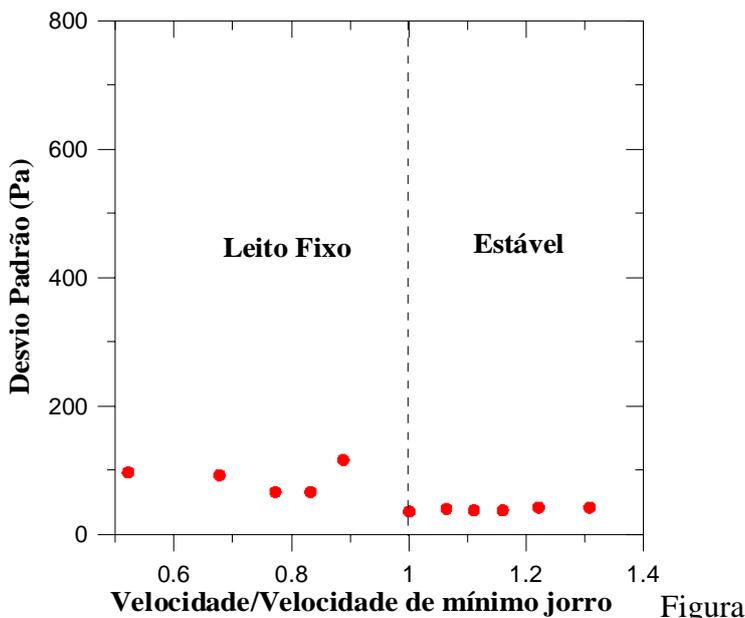


Figura 12 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 3,675 mm.

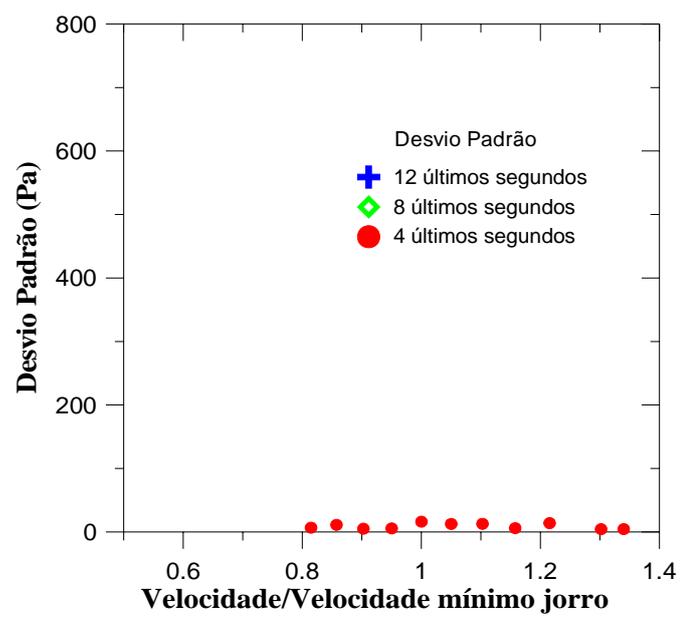


Figura 13 – Simulação em 3D para esferas de 3,675 mm.

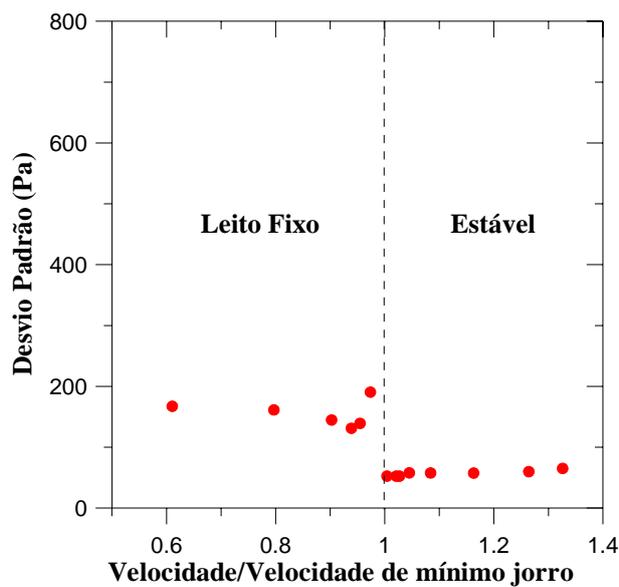


Figura 14 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 2,18 mm.

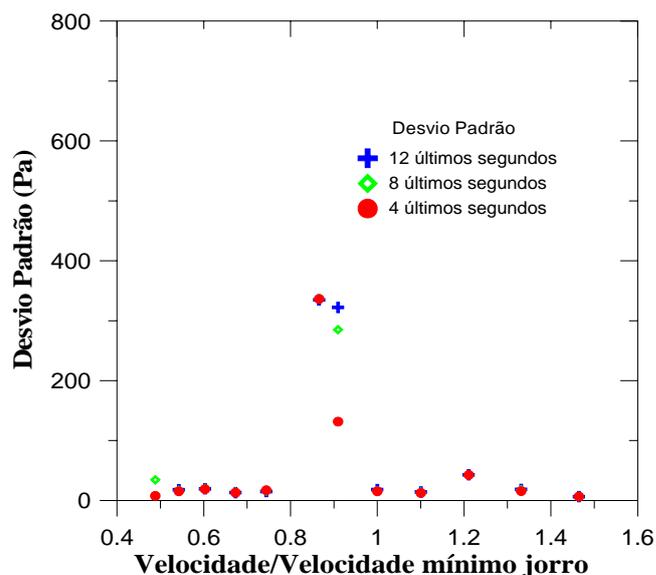


Figura 15 – Simulação em 3D para esferas de 2,18mm.

Para uma condição de regime instável, o mesmo pôde ser caracterizado por um crescente desvio padrão dos sinais de queda de pressão para velocidades acima da de mínimo jorro, como mostram as Figuras 10 e 11. Foi, também, possível a caracterização através de simulação, do regime de jorro estável, mostrando-se em concordância, qualitativa, com o experimental (BACELOS, 2006). Isto indica uma possível possibilidade de simulações em 3D serem utilizadas na caracterização das condições de instabilidade de um leito de jorro. As figuras a seguir mostram os mesmos resultados experimentais anteriores (BACELOS, 2006) e simulados, agora, em 2D, com eixo axial, para esferas de diâmetro de 1,29 mm, 2,18 mm e 3,675 mm.

Da mesma forma que nos dados anteriores, podemos notar que o tempo de simulação não influenciou significativamente os resultados. Por outro lado verifica-se, através de uma observação da Figura 17 que, diferentemente dos dados experimentais (BACELOS, 2006) mostrados, agora pela Figura 16, para esferas de 1,29 mm, não ocorre um aumento monotonico do desvio padrão à medida que a velocidade aumenta acima da velocidade de mínimo jorro. O que mostra uma discrepância qualitativa em relação ao conceito de instabilidade proposta por XU *et al.* (2004).

Em relação à estabilidade, as simulações, também, não se mostraram qualitativamente em concordância com os dados experimentais como pode ser visto nas Figuras 19 e 21, pois

não apresentaram praticamente nenhuma variação do desvio padrão ao se variar a velocidade de ar, ou seja, não apresentaram variações na fluidodinâmica do escoamento ar-sólido o que seria contra os fatos naturais.

Isto indica que, possivelmente, a utilização de simulações em 2D com eixo de simetria, não prevêem a caracterização dos regimes de instabilidades.

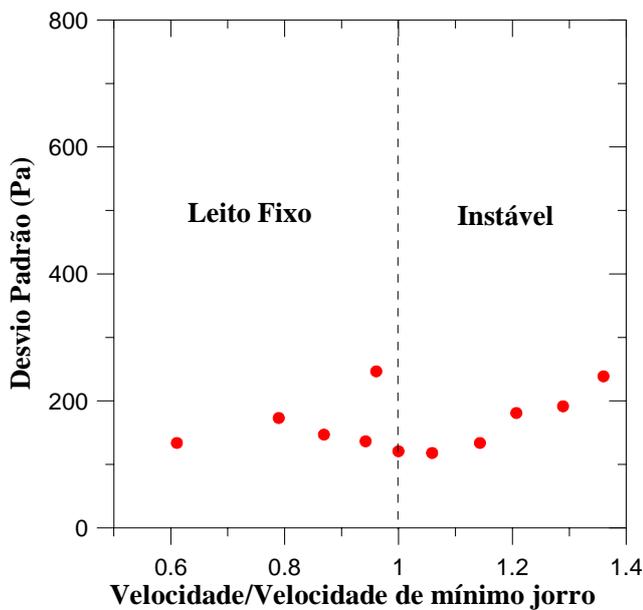


Figura 16 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 1,29 mm.

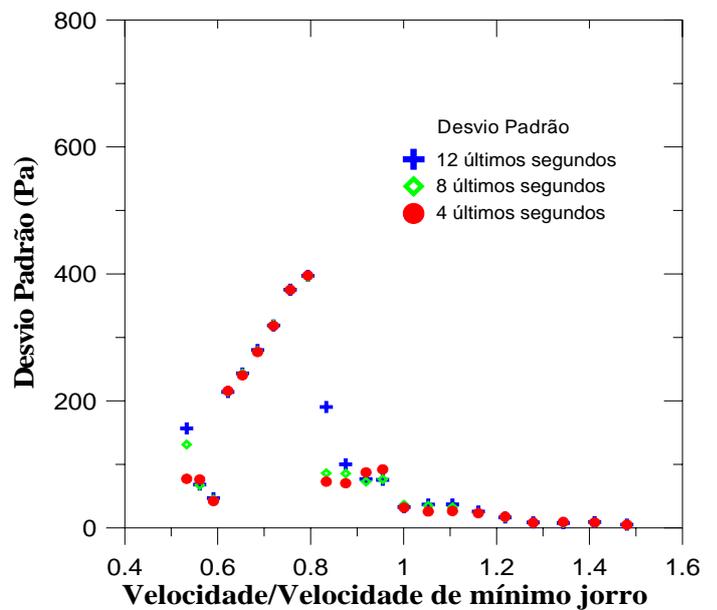


Figura 17 – Simulação em 2D com eixo axial para esferas de 1,29mm.

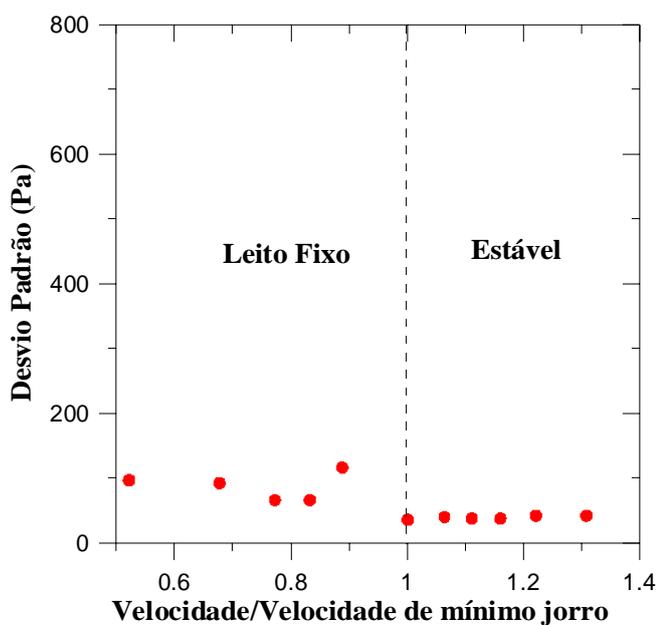


Figura 18 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 3,675 mm.

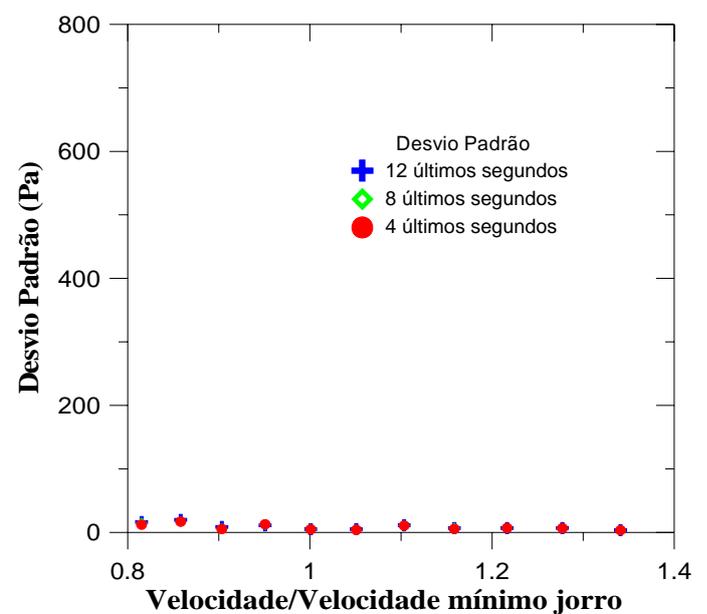


Figura 19 – Simulação em 2D com eixo axial para esferas de 3,675mm.

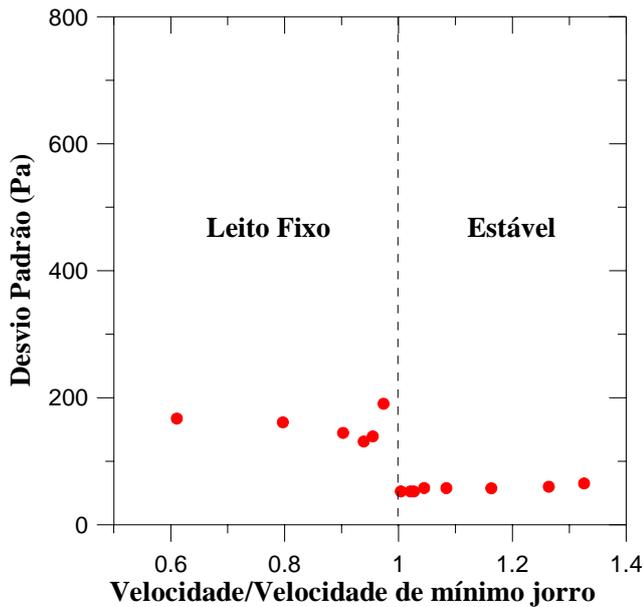


Figura 20 – Dados experimentais (BACELOS, 2006) para esferas de 2,18 mm.

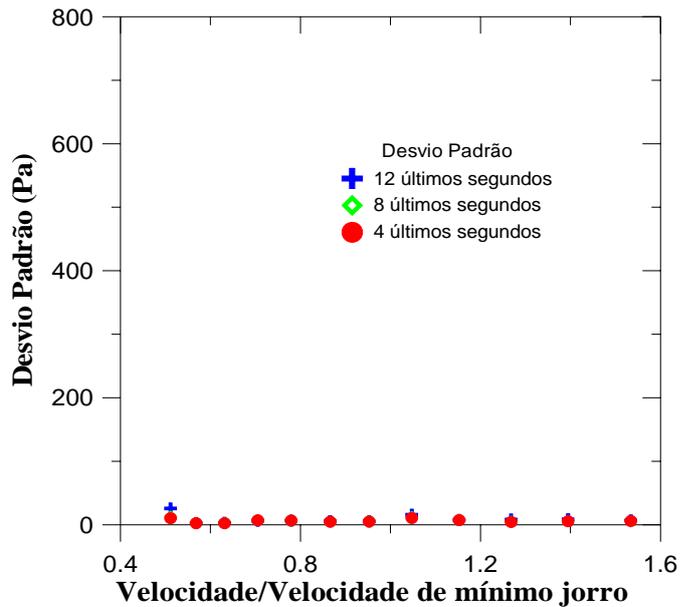


Figura 21 – Simulação em 2D com eixo axial para esferas de 2,18mm.

Com a utilização de simulações em 2D sem eixo axial não foi possível a obtenção dos dados pois a mesma se mostrou incoerente do ponto de vista fenomenológico.

#### 4- CONCLUSÕES

Em relação aos perfis de velocidade de sólidos, foi possível notar uma boa concordância entre os dados simulados e experimentais na região anular para todas as distâncias da parede frontal. Já em relação à região de jorro, observou-se concordância somente para determinadas distâncias da parede frontal. As discrepâncias observadas na região de jorro entre as outras distâncias simuladas e o experimental podem ter sido em virtude de, à medida que se aumenta a profundidade, partindo-se da parede frontal, as velocidades tendem a aumentar passando por um máximo a uma determinada profundidade e, após esta passam a diminuir o que indica que deve-se ter o cuidado de, na obtenção de dados de velocidade de partículas, levar em consideração a medida precisa da distância que as mesmas se encontram da parede frontal, evitando-se, assim, conclusões erradas. Conclui-se também, com base nos resultados obtidos no presente trabalho, que, quando da simulação de partículas de tamanho único, ou seja, monopartículas, a consideração de duas fases sólidas e uma fase ar, levando em consideração os efeitos de interação sólido1-sólido2, sólido1-ar e sólido2-ar, ao invés de uma única fase sólida e uma fase ar, leva a resultados mais coerentes em relação ao experimental.

Já em relação à caracterização dos regimes de leito fixo, leito estável e leito instável através de simulações utilizando-se dados experimentais de BACELOS (2006) conclui-se que:

- 1 - A utilização de simulações em 3D mostrou-se satisfatória, qualitativamente, na caracterização do regime de instabilidade e estabilidade em um leito de jorro;
- 2 - Através de simulações em 2D com eixo axial, não foi possível identificar fatos que caracterizassem regimes de instabilidade ou de estabilidade;
- 3 - Não é possível a obtenção de dados coerentes do ponto de vista fenomenológico através da realização de simulações em 2D sem eixo axial.

## **5-AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio concedido.

## **6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AGUADO, R.; OLAZAR, M.; SAN JOSE, M. J.; AGUIRRE, G.; BILBAO, J. Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor: Yields and product composition, *Ind. Eng. Chem.*, v. 39, p. 1925-1923, 2000.
- BACELOS, M. S. Análise do Comportamento da Fluidodinâmica do leito de jorro com Mistura de tamanho de Partículas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, p.65. 2006.
- BARROZO, M. A. S.; LUCAS, K. B. C.; DUARTE, C. R. - Soybean seed inoculation with Bradyrhizobium using a spouted bed, *Seed Science and Technology*, v.36, p. 89-98, 2008.
- CASSANELLO, J.; LARACHI, M., F.; LEGROS, R.; CHAOUKI, J. - Solids dynamics from experimental trajectory time-series of a single particle motion in gas-spouted beds, *Chemical Engineering Science*, v. 54, Issues 13-14, p. 2545-2554. 1999.
- DU, W., BAO, X., XU, J.; WEI, W.- Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations, *Chemical Engineering Science*, Available online 11 October 2006, In Press.
- DUARTE, C. R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e revestimento de partículas em leito de jorro. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 197p.. 2006.
- DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. A - Study of the Fluid Dynamics of the Spouted Bed Using CFD, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 2, p. 263-270, 2005.
- HE, Y. L.; LIM, C.J.; GRACE, J.R.; ZHU, J.X. Measurements of Voidage Profiles in Spouted Beds, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 72, p. 229-234, 1994.
- ISHIKURA, T.; NAGASHIMA, H.; IDE, M. - Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, *Powder Technology*, v. 131, p. 56-65, 2003.

- KAWAGUCHI, T.; SAKAMOTO, M.; TSUJI, T. T. - Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, *Powder Technology*, v. 109, p. 3-12, 2000.
- KAWAGUCHI, T.; TSUJI, T. T. - Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method, *Powder Technology*, v. 96, p. 129-138, 1998.
- KONDURI, R.K.; ALTWICKER, E.R.; MORGAN III, M.H. - Design and scale up of a spouted-bed combustor, *Chemical Engineering Science*, v. 54, p. 185–204, 1999.
- KRZYWANSKI, R.S.; EPSTEIN, N.; BOWEN, B.D. - Multi-dimensional model of a spouted bed, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 70, p. 858–872, 1992.
- LARACHI, F.; BERNARD, P.; GRANDJEAN, A.; CHAOUKI, J. Mixing and circulation of solids in spouted beds, *Chemical Engineering Science*, v.10, p. 1-11, 2002
- LU, H.; HE, Y.; LIU, W.; DING, J.; GIDASPOW, D.; BOUILLARD, J. - Computer simulations of gas–solid flow in spouted beds using kinetic–frictional stress model of granular flow. *Chemical Engineering Science*, v. 59, p. 865–878, 2004
- LU, H.; SUN, Y.; LIU, Y.; HE, Y.; BOUILLARD, J. - Numerical simulations of hydrodynamic behavior in spouted beds, *Chemical Engineering Research and Design*, v. 79, p. 593–599, 2001.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. *Spouted Beds*, New York: Academic Press Inc. LTD., 1974.304p.
- NETO, J.L. V. ; BORGES, J.E. ; DUARTE, C.R. ; BARROZO, M. A.S. - Coating of Particles in Spouted Bed: Flow Regime and Stability, *Materials Science Forum*, v. 573, p. 660-661, 573, 2010.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUADO, R.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. - Minimum spouting velocity for the pyrolysis of scrap types with sand in conical spouted beds, *Powder Technology*, v.165, p. 128-132, 2006
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; AGUADO, R.; ALVAREZ, S.; BILBAO, J. - Minimum spouting velocity for the pyrolysis of scrap types with sand in conical spouted beds, *Powder Technology*, v.60, p. 2017-2025, 2005.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M.J.; IZQUIERDO, M.A.; SALAZAR, A.O.; BILBAO, J. - Effect of operation conditions on solid velocity in spout, annulus and fountain of spouted beds, *Chemical Engineering Science*, v.56, p. 3585-3594, 2001.
- ROY, D.; LARACHI, F.; LEGROS. R.; CHAOUKI, J.A - study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 72, p. 945-952, 1994.
- SILVA, D. O. ; TAMIOZZO, L. M. ; DUARTE, C. R. ; MURATA, V. V. ; BARROZO, M. A. S. - Modeling of seed coating in spouted bed, *Drying Technology*, v. 29, p. 286-294, 2011.
- TAGHIPOUR, F.; ELLIS, N., WONG; C. - CFD Modeling of a Two-dimensional Fluidized-Bed Reactor, *CFD 2003: The 11th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, May, Vancouver, p. 123-132, 2003.
- WEI, D.; XIAOJUN, B.; JIAN, X.; WEISHENG, W. - Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of articles, *Chemical Engineering Science*, v. 61, p.4558 – 4570, 2006.
- WEI, D.; XIAOJUN, B.; JIAN, X.; WEISHENG, W. - Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations, *Chemical Engineering Science*, v. 61, p. 1401-1420, 2006.
- XU. J.; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN, S.; BI, H. T.; GRACE, J. R.; LIM, C. J. - Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds, *Powder Technology*, v. 140, p. 141-154, 2004.