

PROJETO E SIMULAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE PARA LIMPEZA DE PRODUTOS DE GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

Moisés Uchôa Neto, uchoa.moises@gmail.com¹

Yuri de Araújo Carvalho, yuricarvalho@hotmail.com¹

Manuel Barcelos Nascimento Júnior, manuelbarcelos@gmail.com²

Taygoara Felamingo de Oliveira, taygoara@unb.br²

Carlos Alberto Gurgel Veras, gurgel@unb.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília - DF, 70910-900.

²Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, Área Especial 2, Lote 14, Setor Central, Gama - DF, 72405-610.

Resumo. O principal objetivo do presente trabalho é projetar um leito fluidizado circulante de bancada para estudar o craqueamento do alcatrão em gases provenientes de processos de gaseificação de biomassa. Para isso, uma metodologia de projeto, baseada em resultados analíticos e correlações empíricas para leitos fluidizados foi empregada. Paralelamente, um código numérico de tecnologia aberta (MFIIX) para a solução das equações de transporte do escoamento multifásico na coluna do leito fluidizado, foi utilizado para dar suporte a escolha dos elementos do projeto. Desenvolveu-se um projeto completo da bancada de leito fluidizado, cujos parâmetros de operação, tais como geometria do leito, velocidade do gás, taxa de circulação e fração de vazio, caracterizam um regime de fluidização rápida. Um estudo preliminar de convergência de malha foi executado com a ferramenta numérica, que foi validada pela comparação com resultados analíticos. Dentre os resultados mais relevantes, o código recuperou o valor previsto da velocidade de mínima fluidização para o leito.

Palavras-chave: Escoamento Multifásico, Leito Fluidizado, Fluidização Rápida, Metodologia de Projeto, Simulação Numérica

1. INTRODUÇÃO

O escoamento relativo entre partículas sólidas e um fluido (gás ou líquido), através de um tubo vertical, promove a suspensão das partículas, definindo um escoamento multifásico, conhecido como leito fluidizado. Esse tipo de escoamento encontra aplicações nas mais diversas áreas da indústria, com destaque para a indústria química e de processos (Basu (2006)).

O regime de fluidização rápida é caracterizado por altas velocidades de escoamento, um grande atrito entre o gás e as partículas e um processo de circulação de sólidos. Tais características são propícias para promover a limpeza de gases provenientes de processos de gaseificação de biomassa, através do craqueamento do alcatrão. Dessa forma, o teor energético do gas resultante ao final da coluna de gaseificação é superior ao do gás na entrada do leito fluidizado, além de haver uma concentração mais baixa de hidrocarbonetos passíveis de condensação nos elementos das unidades geradoras que utilizam o gás como combustível.

A fim de estudar esse regime de fluidização e a sua aplicação na limpeza dos gases, o objetivo deste trabalho inclui o projeto de um leito fluidizado de bancada, incluindo os projetos do reator, do separador de partículas e de um sistema de alimentação de partículas. Além disso, análises numéricas das condições do escoamento nas especificações de projeto serão realizadas.

2. METODOLOGIA DE PROJETO DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

2.1 Escolha das Partículas da Fase Sólida

A primeira etapa do projeto de um leito fluidizado requer a caracterização física do gás e das partículas que serão utilizadas. Dentro da experiência da fluidização, há uma classificação das partículas em quatro grupos principais: A, B, C

e D, feita por Geldart (1973), função do diâmetro e da massa específica. Essa classificação é muito importante, já que partículas de grupos diferentes se comportam de forma diferente quando submetidas a condições similares. Segundo Basu (2006), muitos leitos circulantes utilizam partículas do grupo A, que são partículas que se encontram na faixa de 30 a 100 μm . As partículas do grupo A fluidizam de forma suave a baixas velocidades do gás e com borbulhamento controlado em pequenas bolhas a velocidades mais altas. Partículas do tipo B também são empregadas em leitos fluidizados circulantes. Levando em conta essas informações, o projeto de leito fluidizado circulante de bancada levará em conta partículas de vidro com 50 μm (tipo A) e 200 μm (tipo B), a serem fluidizadas pelo próprio ar atmosférico.

2.2 Velocidades Características do Leito Fluidizado

2.2.1 Velocidade de Mínima Fluidização

Considerando um tubo circular alinhado verticalmente, dentro do qual há certa quantidade de partículas, é possível conceber um experimento imaginário em que ar é injetado pela parte inferior do tubo à velocidades gradativamente crescentes. Quando as velocidades são suficientemente baixas, as partículas mantêm-se paradas, e o leito comporta-se como um meio poroso, tal que a diferença de pressão percebida ao longo da coluna é dada pela lei de Darcy. À medida que se aumenta o fluxo ascendente, chega-se a um ponto crítico no qual o comportamento do leito muda e o mesmo sofre uma pequena expansão. Esta velocidade é conhecida como *velocidade de mínima fluidização*. Nesse ponto, a força de arrasto líquida ($\Delta p A$) se iguala ao peso aparente do leito. Isso pode ser escrito como

$$\Delta p A = A L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g, \quad (1)$$

em que Δp é a queda de pressão ao longo da coluna, A a área da seção transversal do tubo, L_{mf} o comprimento do leito na mínima fluidização, ε_{mf} a fração de vazio na mínima fluidização, ρ_p a massa específica das partículas, ρ_g a massa específica do gás e g a aceleração da gravidade.

O lado esquerdo da Eq.(1), representa o arrasto sobre o leito, e o lado direito representa o peso das partículas. Após se desenvolver esta equação juntamente com a relação de Ergun, obtém-se a seguinte equação.

$$Re_{mf} = \frac{(U_{mf} d_p \rho_g)}{\mu} = [C_1^2 + C_2 Ar]^{0.5} - C_1, \quad (2)$$

em que Re_{mf} é o número de Reynolds da partícula na condição de mínima fluidização, U_{mf} é a velocidade de mínima fluidização, d_p é o diâmetro da partícula, μ é a viscosidade do gás, C_1 e C_2 são valores recomendados por Grace (1982) e Ar é o número de Arquimedes, definido por

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2}. \quad (3)$$

O fato do leito expandir significa que L_{mf} e ε_{mf} são diferentes na mínima fluidização do que eram no leito fixo. A velocidade mínima de fluidização marca a transição de leito fixo para leito fluidizado.

2.2.2 Velocidade de Transporte

A velocidade de Transporte é a velocidade abaixo da qual a fluidização rápida não pode ocorrer, independente da taxa de circulação de sólidos. A partir desse ponto, a velocidade do gás através do leito é superior à velocidade terminal das partículas. Dessa forma, um leito fluidizado operando no regime de fluidização rápida requer um sistema de coleta das partículas e realimentação contínua das mesmas na base do leito, de forma que o mesmo não se esvazie. Uma relação empírica para a velocidade de transporte, baseada em experimentos com uma coluna de 92mm de diâmetro, é dada por (J. F. Perales and Casal (1991))

$$U_{tr} = \frac{1.45 \mu Ar^{0.484}}{\rho_g d_p}, \quad 20 < Ar < 50000. \quad (4)$$

Considerando as equações (4) e (2), as velocidades de transporte obtidas para as partículas empregadas no presente projeto são dadas na Tab.(1). Adicionalmente, na Fig. (1), círculo cheios marcam o ponto a partir do qual a velocidade do gás atinge a velocidade de transporte.

Tabela 1. Velocidades características das partículas selecionadas

Diâmetro	U_{mf}	U_{tr}
50 μm	0.0024	1.394
200 μm	0.0388	2.610

2.2.3 Velocidade Crítica de Fluidização Rápida

A velocidade crítica de fluidização¹ marca o início do regime de fluidização rápida, imediatamente após o regime turbulento de fluidização, o que torna esse parâmetro de central importância para o projeto da bancada de leito fluidizado circulante. A velocidade crítica de fluidização está diretamente ligada a taxa de circulação de partículas. Quanto maior a taxa de circulação de partículas, mais estável é o leito rápido. A Correlação de Yang (1983), mostrada na Eq.(5), desenvolvida para partículas do grupo A, à temperatura ambiente e usando colunas de transporte pneumático de pequeno diâmetro ($D < 0,3m$), pode ser usada para uma primeira aproximação desse parâmetro.

$$\frac{U_{ch}}{\varepsilon_c} = U_t + \sqrt{\frac{(2gD(\varepsilon_c^{-4,7} - 1)\rho_p^{2,2})}{(6,81 \times 10^5 \rho_g^{2,2})}} \quad (5)$$

em que U_{ch} é a velocidade crítica de fluidização, ε_c a fração de vazio nessa velocidade e U_t a velocidade terminal das partículas. A Equação (5) deve ser resolvida simultaneamente com a definição de taxa de circulação das partículas à velocidade igual a U_{ch} , dada pela Eq.(6),

$$G_s = (U_{ch} - U_t)(1 - \varepsilon_c)\rho_p, \quad (6)$$

em que G_s é a taxa de circulação de partículas, dada em $kg/(s \cdot m^2)$. Para cada valor de G_s , as Equações (5) e (6) são resolvidas simultaneamente para se determinar U_{ch} e ε_c . O resultado desse procedimento, pode ser observado na Fig.(1).

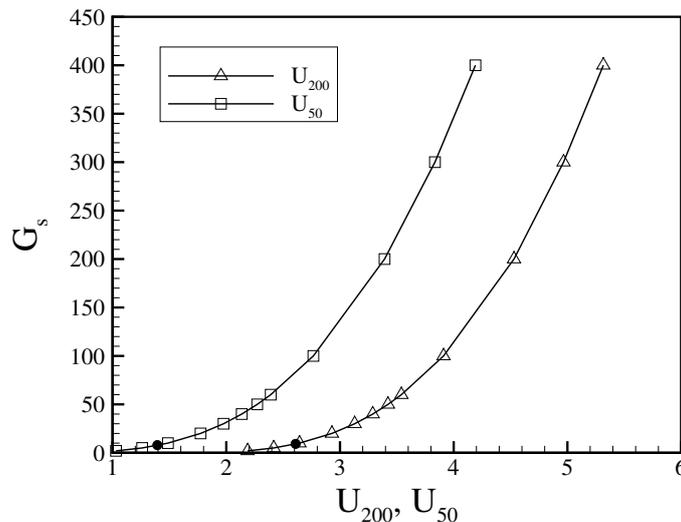


Figura 1. Velocidade crítica de leito fluidizado rápido. Os círculos cheios marcam o valor da velocidade mínima de transporte, a partir da qual as partículas são carregadas pelo gás.

2.3 Projeto de um Leito Fluidizado Circulante de Bancada

2.3.1 Reator

O reator é o leito propriamente dito, onde deve ocorrer o contato entre o gás e as partículas (idealmente de dolomita ou outro agente catalítico sólido). O fator mais importante para se atingir determinado regime de fluidização é a velocidade

¹Traduzido do inglês *Choking Velocity*

do gás. Para controlar esse parâmetro pode-se modificar a vazão e a área da seção transversal do tubo. Dessa forma, pode-se escolher uma seção transversal que convenha para o projeto, somente observando a possibilidade de instalação de um ventilador que proporcione as velocidades necessárias. Vale lembrar que tubos de menor raio têm maior tendência de apresentarem variações radiais de propriedades do escoamento, em virtude da maior importância dos efeitos de parede, nesses casos. A altura do leito é importante quando considera-se a ocorrência de reações químicas dentro do leito, já que a esta afetará o tempo de contato entre gás e sólido. Como há uma grande liberdade para as dimensões do reator, o que nos limita são apenas as condições do mercado. O reator será feito de acrílico para que possam ser feitas visualizações de sua parte interna. O diâmetro escolhido para o tubo foi de 12cm, para operar com velocidades da ordem de 4m/s.

2.3.2 Separador de Partículas

No caso de leitos rápidos, o tipo de separador mais utilizado é o ciclone. O processo de separação de partículas é feito por forças centrípetas, as partículas são jogadas para fora quando é imposto um movimento circular ao fluido. O tipo selecionado para o nosso leito foi o ciclone cilíndrico com eixo de simetria na vertical. A parte superior do ciclone tem o formato cilíndrico, enquanto que a parte inferior é cônica. A suspensão de gás-sólido entra tangencialmente no ciclone por um duto retangular. O formato cilíndrico do ciclone e a entrada tangencial do gás fazem a trajetória da suspensão percorrer dois vórtices concêntricos ao redor do eixo do ciclone. O vórtice externo se direciona para baixo enquanto o vórtice interno se direciona para cima. As partículas, sendo mais densas do que o gás, são empurradas para fora pela força centrífuga em direção às paredes do ciclone com uma velocidade radial V_r . Os efeitos viscosos são maiores nas proximidades da parede, fazendo com que a velocidade da suspensão diminua, não sendo mais capaz de carregar as partículas, que escorregam para baixo e são coletadas na parte inferior do ciclone, de onde elas novamente são re-encaminhadas para a parte inferior do reator.

O movimento da partícula na direção radial é dado pelo equilíbrio da Força Centrífuga com o Arrasto Viscoso, dado pela Lei de Stokes. Desenvolvendo a equação, obtém-se a velocidade radial

$$V_r = \frac{d_p^2 \rho_p V_e^2}{18 \mu r}, \quad (7)$$

em que V_e é a velocidade do gás na entrada do ciclone e r o raio do ciclone.

Em uma situação ideal, todas as partículas que atingem a parede são capturadas. A eficiência do ciclone então é diretamente proporcional à velocidade V_r . Quanto mais rápido as partículas se moverem em direção à parede, maior a chance de serem capturadas antes de serem arrastadas. No entanto, a operação real de ciclones é bem diferente dessa situação ideal. É muito difícil definir um diâmetro de corte onde todas as partículas abaixo desse diâmetro serão arrastadas, e as maiores serão coletadas. Projetistas então definiram um tamanho de corte prático por d_{50} . Partículas maiores que este valor tem 50% de chance de serem capturadas. Pell and Dunson (1997) definem o d_{50} considerando o número de espirais que uma partícula percorre no ciclone, como mostrado na Eq.(8),

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \mu L}{2 \pi N_c V_c (\rho_p - \rho_g)}} \quad (8)$$

em que L é a largura do duto retangular de entrada e N_c é o valor efetivo de voltas feitas pelo gás no ciclone dado calculado Zenz (1997).

Para o projeto de um ciclone, Basu (2006) sugere a utilização de uma tabela com relações dimensionais dependendo do que se espere do ciclone. No nosso caso escolhemos adotar as relações para um ciclone de alta eficiência dadas por Swift (1969). O detalhe do separador pode ser visualizado na Fig.(2b).

2.3.3 Alimentador/Dosador de Partículas

Assim que as partículas são separadas do gás, elas precisam ser re-alimentadas no leito. Se a taxa com que essa alimentação é feita for controlada, isso dará uma grande liberdade nos experimentos. Para isso foi selecionado um dispositivo que dose a quantidade de partículas que entra no leito. Esse dispositivo funciona com uma rosca transportadora ligada a um motor de passo, que pode ser visualizado na Fig.(2c), com detalhes para as seções de entrada e saída de partículas. Quando a rosca gira, partículas são transportadas continuamente com uma taxa conhecida. Na Fig.(2a) mostra-se o desenho da bancada completa com todos os seus elementos.

3. Modelagem Física

O estudo proposto neste trabalho emprega o modelo MFIX (Multiphase Flow with Interphase eXchange) para avaliar os processos físicos que ocorrem dentro de um reator tipo leito fluidizado. O MFIX modela o problema físico utilizando

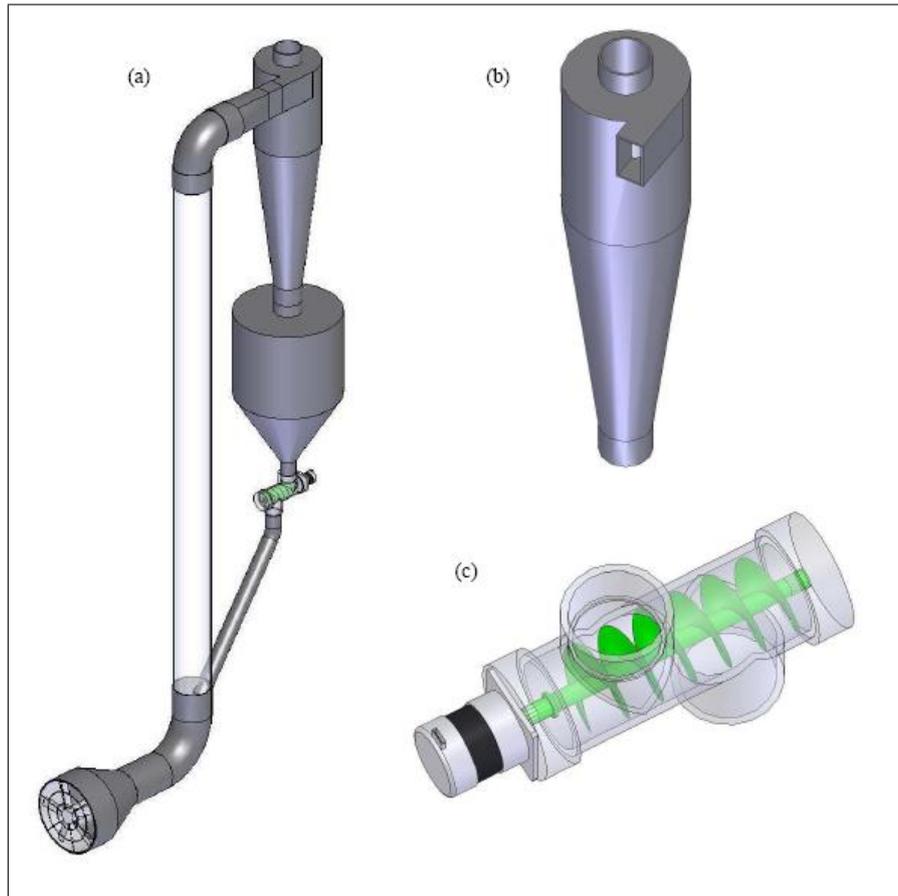


Figura 2. Projeto do leito fluidizado circulante de bancada.

um conjunto de equações principais relacionadas à massa, ao momento, à energia e ao balanço de espécies químicas para as fase gasosa e múltiplas fases sólidas, complementadas por equações secundárias para a tensão granular baseadas na teoria cinética, na teoria de escoamento com atrito e em reações químicas (Syamlal *et al.* (1993)). Em outras palavras, o modelo MFIX é baseado na teoria de hidrodinâmica de fluidização com a capacidade de descrever reações químicas e transferência de calor em escoamentos fluido-sólido densos e diluídos.

No MFIX, as diferentes fases são descritas matematicamente como um contínuo interpenetrante utilizando uma abordagem por médias para representar as variáveis do problema. As variáveis são a média sobre a região que é grande quando comparada com o tamanho da partícula mas muito menor do que o domínio do fluido. Logo, uma variável de campo é introduzida para descrever as frações de volume fásico (ε), permitindo o rastreamento da fração do volume médio ocupado por várias fases. A soma de todas as frações de volume deve ser um, tal que

$$\varepsilon_g + \sum_{m=1}^M \varepsilon_{sm} = 1 \text{ Os índices } ()_g \text{ e } ()_s \text{ representam as fases gasosa e sólida, respectivamente, e } M \text{ é o número de}$$

fases sólidas e o índice $()_m$ identifica uma fase sólida em específico. As massas específicas efetivas são $\rho_{g'} = \varepsilon_g \rho_g$ para a fase gasosa e $\rho_{s'm} = \varepsilon_{sm} \rho_{sm}$ para a fase sólida.

A conservação de massa é expressa pelas Equações (9) e (10), respectivamente referentes à continuidade para uma fase gasosa e de múltiplas fases sólidas.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{gn} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{sm} \rho_{sm}) + \nabla \cdot (\varepsilon_{sm} \rho_{sm} \vec{v}_{sm}) = \sum_{n=1}^{N_{sm}} R_{smn} \quad (10)$$

Nas Equações (9) e (10) o símbolo \vec{v} representa a velocidade das fases. O termo $R_{()}$ no lado direito representa a transferência de massa através da interface por causa de processos diferentes tais como reações químicas e evaporação. O

índice N leva em conta o número total de processos, e o índice $()_n$ indica um processo específico. As equações da fase do fluido são complementadas por meio de equações de estado, com o fluido sendo modelado por um gás obedecendo a lei do gás ideal ou um fluido incompressível com densidade constante.

Na conservação do momento, o equilíbrio do momento segue a mesma separação utilizada nas equações de continuidade, de forma que para a fase gasosa e para as fases sólidas tem-se que

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = \nabla \cdot \bar{\bar{S}}_g + \rho_g \varepsilon_g \vec{g} - \sum_{m=1}^M \vec{T}_{gm} + \vec{f}_g, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{sm} \varepsilon_{sm} \vec{v}_{sm}) + \nabla \cdot (\rho_{sm} \varepsilon_{sm} \vec{v}_{sm} \vec{v}_{sm}) = \nabla \cdot \bar{\bar{S}}_{sm} + \rho_{sm} \varepsilon_{sm} \vec{g} - \sum_{l=1, l \neq m}^M \vec{T}_{ml}, \quad (12)$$

em que $\bar{\bar{S}}_{()}$ representa os tensores das fases, \vec{f}_g é o atrito no fluido devido a superfície porosa interna, \vec{T}_{gm} são as interações de forças entre as fases gasosa e sólida, \vec{T}_{ml} são as interações de força entre as fases sólidas e \vec{g} é o vetor força gravitacional.

O modelo do MFIX apenas leva em consideração força de empuxo ($-\varepsilon_{sm} \nabla P_g$, onde P_g é a pressão da fase gasosa), força de arrasto ($\vec{F}_{gm} (\vec{v}_{sm} - \vec{v}_g)$, onde \vec{F}_{gm} é um parâmetro que relaciona correlações de velocidade terminal a correlações de arrasto) e variação do momento devido a transferência de massa ($R_{gm} [\xi_{gm} \vec{v}_{sm} + (1 - \xi_{gm}) \vec{v}_g]$, com $\xi_{gm} = 1$ para $R_{gm} < 0$ e $\xi_{gm} = 0$ para $R_{gm} > 0$), como interações entre gás e sólidos porque estas são as mais significativas. As interações de força entre sólido e sólido são assumidas apenas funções do arrasto entre fases sólidas o que é quantificado no modelo do MFIX com base na teoria cinética.

As equações de conservação do gás são completadas com equações comuns de estado do fluido, e o tensor do gás é modelado com componentes hidrostáticas ($-P_g \bar{\bar{I}}$) e viscosas ($\bar{\bar{\tau}}_g$). Entretanto, o tensor de múltiplas fases sólidas é modelado como se as fases sólidas fossem escoamentos granulares plástico (cisalhamento vagarosos, contato contínuo, transferência de momento por fricção) e viscosos (cisalhamento rápidos, contatos transientes, transferência de momento por colisão) tendo componentes similares a escoamentos de fluidos, tal como o tensor do fluido ($\bar{\bar{S}}_{sm} = -P_{sm} \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_{sm}$). O modelo do tensor depende da condição de empacotamento do leito ε_g^* ($\varepsilon_g \leq \varepsilon_g^*$ para escoamentos granulares plásticos, $\bar{\bar{S}}_{sm}^p$, $\varepsilon_g > \varepsilon_g^*$ para escoamentos granulares viscosos, $\bar{\bar{S}}_{sm}^v$).

Como os escoamentos modelados com o MFIX para o estudo proposto por este trabalho são de natureza isotérmica. E o principal interesse é a solução do escoamento com interação entre gás e partículas sólidas, mas sem a ocorrência de reações químicas. Então, as equações relativas a conservação da energia não são aqui introduzidas pois não fazem parte do modelamento empregado.

Todo o conjunto de equações, aqui apresentado, pode ser discretizado sobre malhas não-uniformes, utilizando sistemas de coordenadas Cartesianas ou Cilíndricas e resolvido pelo método de volumes finitos. O núcleo do código numérico é baseado no SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) (Syamlal (1998)). Pequenas modificações estão presentes no SIMPLE de modo a melhorar estabilidade e rapidez de cálculo. Primeiramente, o MFIX tem implementado no código uma equação para correção da fração de volume sólido, o que melhora convergência quando os sólidos estão com baixa densidade de empacotamento, e também estabiliza cálculos em regiões com alta densidade de empacotamento. Além disto, o MFIX tem adaptado ao código numérico um ajuste automático de passo de tempo para assegurar alta rapidez de execução. A acurácia da discretização numérica é melhorada utilizando-se esquemas numéricos de segunda ordem para discretizar no espaço os termos de convecção, o que ajuda a controlar erros numéricos de difusão, e como resultado direto, há a predição de padrões em escoamentos que representam de forma mais realística a física do problema estudado. O código MFIX é escrito em na linguagem FORTRAN e tem uma estrutura amigável ao usuário, tal como arquivos de entrada de fácil manipulação, arquivos otimizados para a menor ocupação de espaço de armazenamento, ferramentas de aceleração de recuperação de dados e completo relato de erros.

4. RESULTADOS PRELIMINARES DAS SIMULAÇÃO NUMÉRICAS

4.1 Simulação do escoamento de Hagen-Poiseuille

Para fins de validação do código, simulou-se o escoamento axissimétrico do ar através de uma tubulação, com raio de 7 cm e comprimento de 200 cm. As condições de contorno utilizadas foram de pressão prescrita na entrada e saída do tubo, além de condição de não-deslizamento na parede. O resultado obtido concorda com a solução analítica, como pode ser visto na Fig(3).

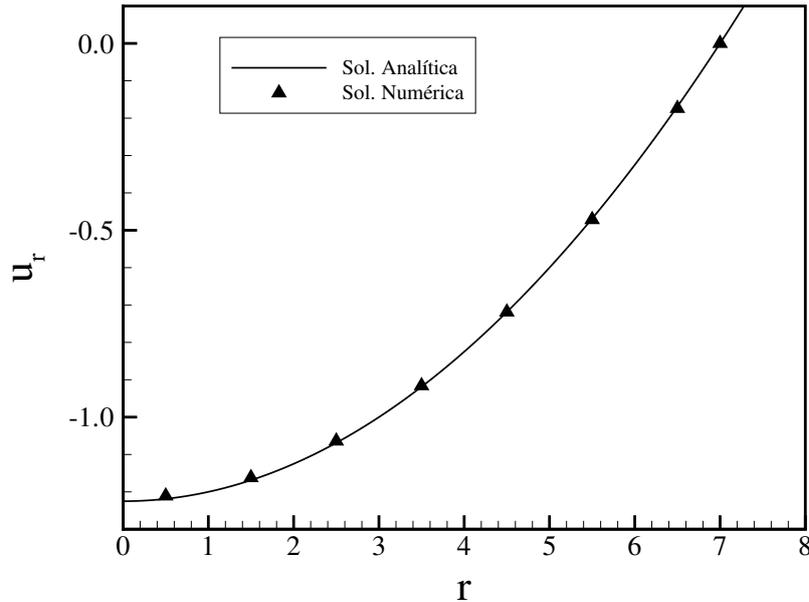


Figura 3. Escoamento laminar plenamente desenvolvido através de uma tubulação circular reta. A linha cheia marca o resultado analítico de referência: $u = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{R^2}{4\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$

4.2 Determinação da mínima velocidade de fluidização

Para estimar a U_{mf} , realizou-se uma simulação de um leito contendo partículas de vidro de $50\mu m$ de diâmetro em um tubo circular de 12 cm de diâmetro por 200 cm de comprimento. A simulação foi realizada em 2 dimensões com perfil axissimétrico tendo como condições iniciais, velocidade do gás e das partículas nulas. Como condições de contorno foi declarada a pressão no topo do tubo e velocidade do gás constante na base do leito bem como condição de não deslizamento na parede. A simulação iniciou-se com velocidade nula a qual foi aumentando gradativamente em um certo intervalo de tempo. Nessa parte tomou-se o cuidado de obter um intervalo de tempo necessário para que o escoamento entrasse em regime permanente a cada velocidade simulada. Ao final obteve-se a diferença de pressão no tubo para cada velocidade simulada.

Inicialmente realizou-se um estudo de convergência de malha para obtenção de resultados mais precisos. Todas as simulações foram executadas com três malhas como pode ser observado na Fig(4). Da malha 1 para a malha 2 alcançou-se uma melhora significativa dos resultados obtidos, porém na malha 3, o código não convergiu a partir de determinado ponto e as melhoras em relação a malha 2 não foram tão significativas quanto observou-se anteriormente entre as malhas 1 e 2.

Com isso foi adotada a malha 2 para obtenção de resultados. Na Fig.(5) foram feitos dois ajustes lineares distintos: Para velocidades inferiores a 0,0028 m/s, obteve-se uma reta crescente, típica de escoamento em meios porosos (região de leito fixo). Para os demais pontos, obteve-se uma reta constante, característica de leitos fluidizados. O cruzamento das retas pode ser usado para estimar a velocidade de mínima fluidização. No presente caso, achou-se o valor de 0,0024 m/s, o que concorda com a estimativa mostrada na Tab. (1).

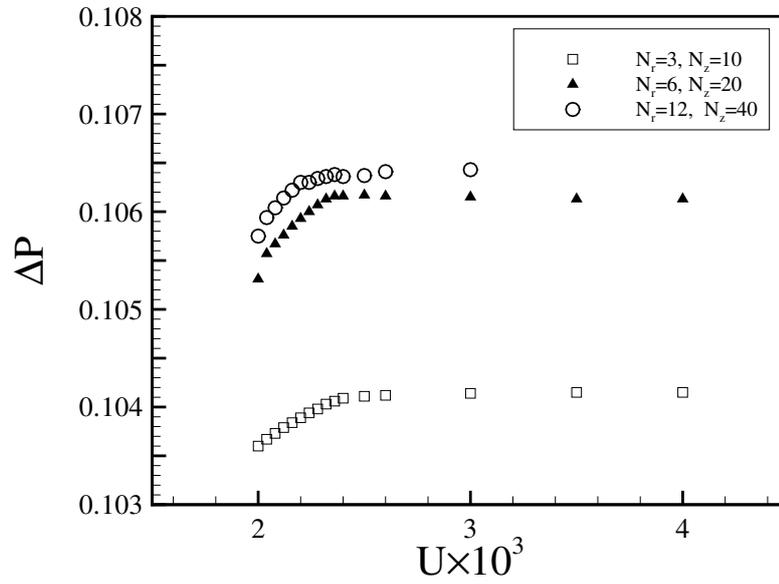


Figura 4. Estudo de convergência da malha.

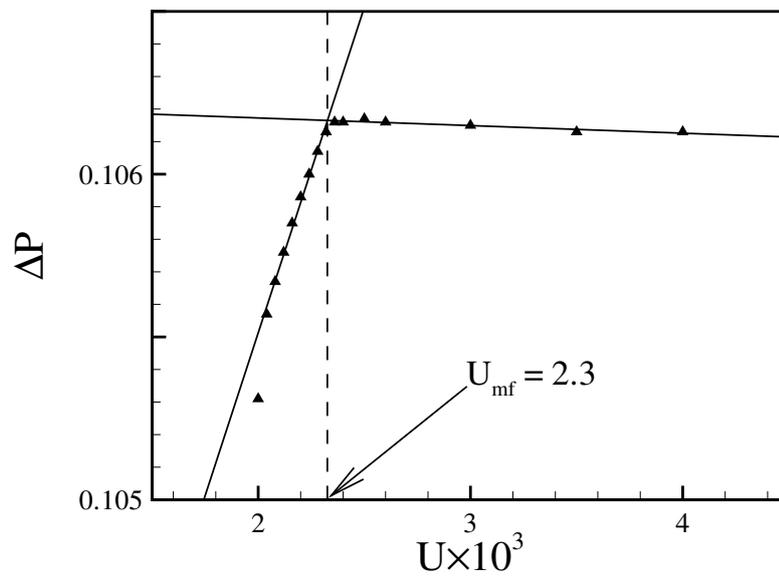


Figura 5. Mínima velocidade de fluidização.

5. CONCLUSÕES

Um projeto de leito fluidizado circulante de bancada foi projetado. Para isso, foi empregada uma metodologia que combina técnicas analíticas, com suporte de correlações empíricas, e técnicas numéricas de simulação de escoamentos. Utilizando as técnicas analíticas os principais parâmetros de projeto foram especificados, de forma que um desenho completo da bancada pôde ser executado com todos os detalhes construtivos. As simulações numéricas foram realizadas utilizando-se o código de tecnologia livre MFIX. Essa ferramenta foi validada com sucesso, pela comparação com resultados experimentais. A velocidade de mínima fluidização foi determinada utilizando-se esse código, obtendo-se um resultado muito próximo das previsões realizadas na primeira etapa.

Trabalhos futuros prevêem o avanço das simulações para o regime de fluidização rápida. Nesse caso, condições de contorno com entrada e saída de partículas devem ser impostas, de forma a se controlar a taxa de circulação. Uma vez que os parâmetros do leito em regime de fluidização rápida forem confirmados, a bancada deverá ser construída para a realização de testes experimentais, pertinentes ao regime de fluidização.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas e pelo auxílio financeiro concedidos.

7. REFERÊNCIAS

- Basu, P., 2006. *Combustion and Gasification in Fluidized Beds Fluidization Engineering*. Taylor & Francis Group, United States.
- Geldart, D., 1973. "Types of gas fluidization". *Powder Technology*, Vol. 7, pp. 285–292.
- Grace, J.R., 1982. *Handbook of Multiphase Systems*. G. Hetsroni, Wasingraceton, D.C.
- J. F. Perales, T. Coll, M.F.L.L.P.J.A. and Casal, J., 1991. *On the transition from bubbling to fast fluidization regimes, Circulating Fluidized Beds III*. Pergamon Press, Oxford.
- Pell, M. and Dunson, B.J., 1997. *Gas Solid Separations, Perry's Chemical Engineering Handbook*. MacGrall-Hill, New York, United States, 7th edition.
- Swift, P., 1969. "Dust control in industry". *Steam Heat Engineer*, Vol. 38, pp. 453–456.
- Syamlal, M., 1998. *MFIX Documentation, Numerical Technique, Technical Note*. U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia.
- Syamlal, M., Rogers, W. and O'Brien, T.J., 1993. *MFIX Documentation, Theory Guide, Technical Note*. U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia.
- Yang, W.C., 1983. "Criteria for choking in vertical pneumatic conveyinf lines". *Powder Technology*, Vol. 35, pp. 143–150.
- Zenz, F.A., 1997. *Perry's Chemical Engineering Handbook*. PSRI, Chicago, USA.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DESIGN AND SIMULATION OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED TO CLEAN THE PRODUCTS OF BIOMASS GASIFICATION

Moisés Uchôa Neto, uchoa.moises@gmail.com¹

Yuri de Araújo Carvalho, yuricarvalho@hotmail.com¹

Manuel Barcelos Nascimento Júnior, manuelbarcelos@gmail.com²

Taygoara Felamingo de Oliveira, taygoara@unb.br²

Carlos Alberto Gurgel Veras, gurgel@unb.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, Technology College, University of Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília - DF, 70910-900.

²Gama College, University of Brasília at Gama, Área Especial 2, Lote 14, Setor Central, Gama - DF, 72405-610.

Abstract. *The main goal of this work is to design a workbench circulating fluidized bed to study the cracking of tar in gases from the processes of biomass gasification. For this, a design methodology based on analytical results and empirical correlations for fluidized beds was employed. In parallel, a numerical code of open source technology (MFIx) for the solution of the transport equations of the multiphase flow in the column of a fluidized bed was used to give support to the choice of the design elements. The whole project of the workbench fluidized bed was completely developed, whose operation parameters such as bed geometry, gas velocity, circulating ratio and void fraction characterize a fast fluidization process. A preliminary mesh convergence study was executed with the numerical tool, that was validated comparing with analytical results. Among the most important results, the code computed the predicted value for the minimum fluidization velocity of the bed.*

Palavras-chave: *Multiphase flow, Fluidized Bed, Fast Fluidization, Design Methodology and Numerical Simulation.*