

ESTUDO DA FLUTUAÇÃO DA PRESSÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

George Clarke BLEYER^{1,a}; Daniel Augusto KESTERING^{1,b}.

¹Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC), ^ageorge.bleyer@satc.edu.br;

^bdaniel.kestering@satc.edu.br.

RESUMO

O regime de fluidização borbulhante é amplamente utilizado na conversão térmica do carvão, como, por exemplo, na combustão e na gaseificação. Este regime de escoamento gás-sólido é, preferencialmente, escolhido na conversão de carvão com alto teor de cinzas, e aceita grande variabilidade nas propriedades dos combustíveis. A fluidização borbulhante é um fenômeno que ocorre quando uma corrente de fluido, gasoso ou líquido, escoar através de um leito de partículas com velocidade suficiente para suspender o leito de partículas e formar bolhas, as quais causam uma flutuação na pressão dentro do leito. Essa flutuação de pressão é dependente da formação de bolha, que, por sua vez, depende de outras variáveis como tamanho e densidade da partícula e velocidade empregada. Para cada partícula, em uma determinada velocidade, obtém-se os dados de flutuação que são analisados segundo frequência de flutuação. Utilizando ferramentas para visualizar os dados no domínio frequência, pode-se verificar a frequência predominante de cada estado de fluidização do leito. O presente trabalho visa utilizar a flutuação de pressão, que é de fácil obtenção com equipamentos simples e amplamente utilizados pela indústria, para verificar o estado de fluidização de um leito, sua frequência de formação e estouro de bolhas. Isto facilitaria a verificação de agitação do leito para que haja uma boa mistura, por exemplo. Além disto, este estudo é base para verificação e validação de simulações de leitos fluidizados borbulhantes em códigos de dinâmica dos fluidos computacional, cujos resultados de pressão também são visualizados em frequência de flutuação. Os resultados numéricos mostram concordância com os dados obtidos experimentalmente, o que mostra sua fácil aplicabilidade na indústria.

Palavras-chave: Flutuação da pressão. CFD. Dinâmica dos fluidos. Leito fluidizado borbulhante.

ABSTRACT

The bubbling fluidization regime is widely used in thermal conversion of coal, such as, for example, combustion and gasification. This gas-solid flow regime, preferably chosen in converting coal with high ash content, and accepting a large variability in the properties of the fuels. Bubbling fluidization is a phenomenon that occurs when a fluid stream, gaseous or liquid, flows through a bed of particles and forms bubbles. This pressure fluctuation is dependent on bubble formation, which, in turn, depends on other variables such as size and density of the particle in addition to the fluid velocity. For each particle, at a given velocity, we obtain data of pressure fluctuation that is analyzed according to the frequency. Using tools to visualize the data in the frequency domain, a predominant frequency of each fluidization state of the bed can be verified. The present work use the pressure fluctuation, which is easy to obtain with simple equipment and widely used by the industry, to verify the state of fluidization of a bed, formation and construction of bubbles. This would facilitate a stirring check of the bed so that there is a good mixing, for example. In addition, this study is the basis for verification and validation of bubble fluidized bed simulations in computational fluid dynamics codes, whose pressure results are also visualized in float frequency. The numerical results show agreement with the data obtained experimentally, which shows its easy application in the industry.

Key-Words: Pressure fluctuation. CFD. Fluid Dynamics. Bubbling fluid bed.

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia no século 20 foi dominada por combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás) que representavam ainda no início do século 21, cerca de 80% de toda a energia produzida no mundo (GOLDEMBERG, 2009).

Nesses processos, o fenômeno de fluidização é empregado para uma melhor queima desse carvão pelo fato de esse método oferecer uma boa mistura entre gás e sólidos, homogeneidade de temperatura, principalmente pela grande quantidade de inerte de leito que gera uma grande inércia térmica.

O processo de fluidização acontece quando um leito de partículas sólidas se comporta como um líquido, por meio de uma passagem de fluido no sentido ascendente através do leito, que gera uma força de arrasto que, juntamente com a força de empuxo, iguala à força da gravidade. Um leito fluidizado pode ser empregado em diversas áreas de atuação sendo elas: equipamentos de secagem, mistura, revestimento de partículas, aglomeração de pós e aquecimento dos sólidos.

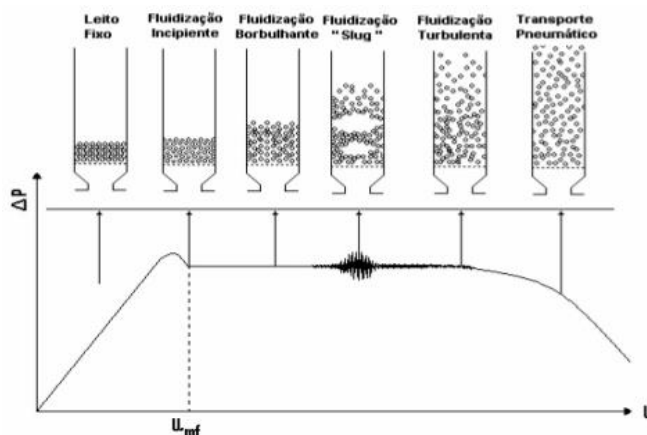
Uma aplicação do leito fluidizado é a conversão de carvão com combustão ou gaseificação. Esse tipo de reator requer uma alimentação de oxigênio e, na gaseificação, vapor através de um distribuidor de gases – que não deve admitir a retroalimentação de carvão – e atravessa, com escoamento vertical, um leito constituído de inerte e combustível sólidos. Com isso o oxigênio e o vapor mantêm o leito em suspensão (fluidizado) em constante borbulhamento, que gera grande movimento de partículas e, conseqüentemente, uma grande mistura.

Como o processo de fluidização, o estudo da flutuação da pressão é feito para caracterizar cada regime do leito, ou seja, com o aumento da velocidade do leito, a flutuação da pressão começa a aumentar, passando assim pelos diversos estados de leito, como leito fixo, fluidização incipiente, leito borbulhante, *slugging*, turbulento e transporte pneumático, como mostra na Figura 1. (FALKOWSKI, 2004)

Essa flutuação da pressão está relacionada diretamente com a formação de bolhas que é proveniente da velocidade empregada no leito e pela densidade da partícula. A flutuação de pressão em um leito fluidizado fornece informações possíveis sobre o que está acontecendo dentro da coluna de

fluidização, por causa de sua relação aproximada com o estado de fluidificação (KAGE *et al.* 2000).

Figura 1 - Regimes de um leito fluidizado borbulhante

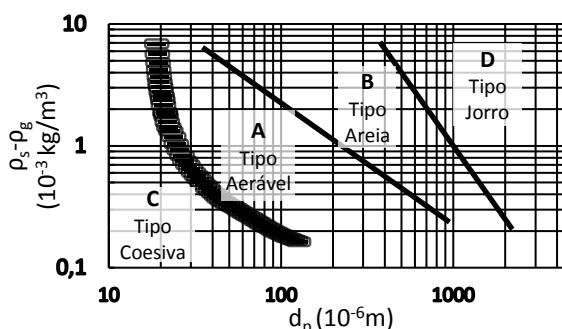


Fonte: Niz (2014).

Geldart (1973) estabeleceu uma classificação de material particulado, no que se refere à fluidização em ar em condições ambiente. Na Figura 2 apresenta-se o diagrama com a classificação de Geldart, que relaciona o tamanho da partícula e a diferença entre a densidade do sólido e do fluido para obter as seguintes classificações:

- Grupo A: material constituído de partículas pequenas que a baixas velocidades fluidiza, mas sem borbulhamento.
- Grupo B: material que apresenta fluidização com borbulhamento desde o início.
- Grupo C: particulado muito fino (poeira), cuja coesão entre as partículas impede a fluidização.
- Grupo D: material composto de partículas muito grandes ou muito densas que formam um leito do tipo jorro. Algumas partículas podem fluidizar com borbulhamento, apesar disto.

Figura 2 - Classificação de Geldart



Fonte: Geldart (1973)

Nos testes realizados foram usados dois tipos de partículas diferentes, esfera de vidro (EV2) e areia de fundição (AF1) cujas propriedades são apresentadas na Tabela 1. As partículas são classificadas segundo Geldart (1973) como: EV2 do grupo D e AF1 do grupo B.

Tabela 1 - Dados das partículas

Parâmetros	EV2	AF1
Diâmetro da partícula [m]	$0,8 \times 10^{-3}$	$0,293 \times 10^{-3}$
Massa específica [kg.m³]	$2,49 \times 10^3$	$2,64 \times 10^3$
Velocidade de mínima fluidização [m/s]	0,408	0,067

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, conhecida como CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) pode ser descrita como uma simulação numérica de todos os processos físico-químicos que apresentam um escoamento. (CAVALCANTI, 2013).

Por ser de grande eficácia, os softwares de simulação são usados para se obter parâmetros de comparação com os dados experimentais.

Neste trabalho, foi utilizado o software Ansys (versão 17.2). Neste software existem vários pacotes: para dinâmica dos fluidos: para análise estrutural, para eletromagnetismo e para reações químicas, por exemplo. Entre esses vários pacotes, foi utilizado o software ANSYS Fluent, do pacote para dinâmica dos fluidos, que contém uma ampla capacidade física para modelar fluxos turbulentos, transferência de calor, combustão em fornos, colunas de bolhas entre outros.

2 ESTUDO

2.1 ANÁLISES DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

A análise de flutuação de pressão dentro de um leito fluidizado borbulhante é um método usado para a caracterização do estado do leito fluidizado borbulhante, só que, a interpretação do sinal de pressão pode não ser tão simples.

O sinal de tempo de pressão é gerado através da resposta física do leito a um fluxo de gás através

dele, mas não está claro como essa relação deve ser interpretada. Uma abordagem utilizada consiste em tratar um leito fluidizado como se fosse formado a partir de um material homogêneo que oscila como resultado da excitação pelo fluxo de gás. As flutuações na altura do leito causam flutuações de pressão dentro dela. Um modelo influente onde as flutuações de pressão resultantes de todo o leito movendo-se para cima e para baixo como um corpo foi proposto por Verloop e Heertjes (1974). Uma abordagem alternativa trata o leito como um meio compressível que responde à excitação do excesso de fluxo de gás.

Primeiramente, o sinal obtido pelos transdutores de pressão são de difícil interpretação, sendo assim necessário ser feito um tratamento matemático para serem analisados. Os dados de séries temporais gerados por um transdutor podem ser considerados de duas maneiras diferentes. No primeiro, o sinal de tempo é caracterizado diretamente. Por exemplo, Verloop e Heertjes (1974) verificaram que o desvio padrão do sinal de pressão em um leito fluidizado aumenta com a velocidade do gás. A segunda maneira de analisar a série temporal é transformá-la no domínio da frequência e caracterizar o espectro de potência de frequência resultante.

Neste trabalho foi utilizado a segunda maneira onde pela transformada rápida de Fourier foi transformado o dado de pressão em dado de frequência.

2.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier de uma função $x(t)$ no intervalo de tempo finito (0 a T) é definida como:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{j2\pi ft} dt. \quad [\text{Eq. 01}]$$

Assumindo que $x(t)$ é amostrado em N pontos que são igualmente espaçados a uma distância de Δt , que é selecionado de forma a produzir uma frequência de corte ajustada para o processo físico valorizado. No entanto, é conveniente começar com $n = 0$. Assim, tem-se:

$$x_n = x(n\Delta t) \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde

$$t = n\Delta t. \quad [\text{Eq. 03}]$$

Similarmente, para f arbitrária, a versão discreta da Equação 1 se torna:

$$X(f, T) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp[-j2\pi f n \Delta t]. \quad [\text{Eq. 04}]$$

A seleção usual dos valores de frequência discreta no cálculo de $X(f, T)$ é a seguinte:

$$f_k = \frac{k}{T} = \frac{k}{N\Delta t} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1. \quad [\text{Eq. 05}]$$

A estas frequências, os valores transformados fornecem os componentes de Fourier definidos para:

$$X_k = \frac{X(f_k)}{\Delta t} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left[-j\frac{2\pi kn}{N}\right] \quad [\text{Eq. 06}]$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Os resultados fornecidos pela Equação 6 só estão disponíveis até $k = N/2$, em virtude da frequência de Nyquist, que ocorre neste ponto. O método FFT é capaz de calcular as quantidades de X_k , que terão como respostas valores diferenciados, de acordo com a característica do processo analisado. Vários processos ocorrem com flutuação que obedece uma certa frequência, denominada de frequência característica. Esta abordagem é utilizada em diferentes áreas de pesquisa para a descrição, caracterização e diferenciação dos mais diversos fenômenos. (BENDAT; PIERSOL, 1986).

2.3 EFEITO DO TAMANHO DA PARTÍCULA

Kunni e Levenspiel (1986) descreveram a relação entre diâmetro e densidade de partículas e os regimes de fluidização. Conforme observado por esses pesquisadores, o *slugging*, (ou agitação turbulenta) frequentemente, ocorre em leitos fluidizados com partículas do grupo D. O critério para determinar se um leito está a fluidizar é geralmente concluído através da observação visual, mas outros métodos que envolvem a amplitude das flutuações de pressão, a ocorrência de um mínimo na magnitude das flutuações de pressão ou a razão entre o tamanho da bolha e o diâmetro do leito são utilizados para diferentes regimes de fluidização..

2.4 EFEITO DA VELOCIDADE

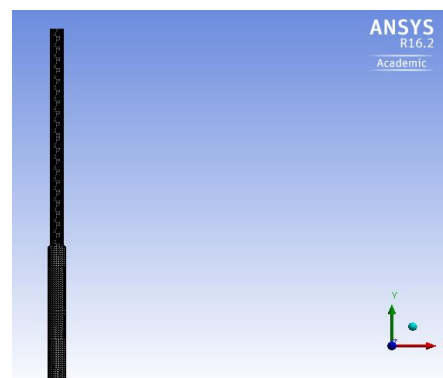
O efeito da velocidade superficial do fluido sobre os espectros de potência das flutuações de

pressão não são bem compreendidos. Os pesquisadores geralmente concordam que a frequência dominante aumenta com o aumento da velocidade superficial. Por exemplo, Fan *et al.* (1981) mediram as velocidades de elevação da bolha em vários regimes de fluidização, incluindo borbulhamento, formação de *slugging* e fluidização turbulenta. Eles mostraram que, para o regime de borbulhamento, tanto a frequência dominante e a velocidade de subida da bolha aumentaram com o aumento da velocidade superficial. Na transição entre os regimes de borbulhamento e *slugging*, observou-se uma queda na velocidade de subida da bolha.

2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS

Os testes de dinâmica dos fluidos computacional foram feitos utilizando o software ANSYS Fluent (versão 17.2), no qual se utilizou uma geometria 3D do riser com as dimensões da bancada, Figura 3.

Figura 3 - Malha do equipamento simulado em 3D



Foram realizados testes para verificação de malha até chegar na configuração adequada, na qual as respostas após refinamento têm variações mínimas.

Os números adimensionais utilizados para o estudo da fluidização, Reynolds e Arquimedes, são mostrados na Tabela 2, juntamente com o modelo de arrasto de Syamlal e O'Brien (1987), que foram utilizados no presente trabalho. O modelo utiliza a abordagem de modelo de dois fluidos e as equações governantes são apresentadas na Tabela 3, ou seja, os balanços de massa, os balanços de quantidade de movimento e a viscosidade de ambas as fases. Essas equações têm como função modelar o estudo fluidodinâmico da fase gasosa e sólida ambas como fluido e os volumes das fases no domínio computacional é definido por fração volumétrica das fases.

Tabela 2 - Números adimensionais e correlação de arrasto

Números adimensionais		
Reynolds	$Re = \frac{\rho_g d_p u_g - u_s }{\mu_g}$	[Eq. 07]
Arquimedes	$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2}$	[Eq. 08]
Velocidade Superficial	$U^* = \frac{Re}{Ar^{\frac{1}{3}}}$	[Eq. 09]
Modelo de Arrasto		
Syamlal O'Brien	$\beta = \frac{3\rho_g \varepsilon_g (1 - \varepsilon_g)}{4d_s v_r^2} C_{D,SO} u_s - u_g $	[Eq. 10]
Coeficiente de arrasto de partícula única, C_D ,	$C_{D,SO} = \left[0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{\frac{Re}{v_r}}} \right]^2$	[Eq. 11]
v_r	$v_r = 0,5 \left(A - 0,006Re + \sqrt{(0,006Re)^2 + 0,12Re(2B - A) + A^2} \right)$	[Eq. 12]
A	$A = \varepsilon_g^{4,14}$	[Eq. 13]
B	$B = \begin{cases} C_2 \varepsilon_g^{1,28} & ; \varepsilon_g < 0,85 \\ \varepsilon_g^{C_1} & ; \varepsilon_g \geq 0,85 \end{cases}$ $C_1 = 2,65 ; C_2 = 0,8$	[Eq. 14]

Tabela 3 – Equações governantes

Equações de Balanço de Massa		
Fase gás	$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g) = 0$	[Eq. 15]
Fase sólido granular	$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s) = 0$	[Eq. 16]
Equações de Balanço de Quantidade de Movimento		
Fase gás	$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g u_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g u_g) = \nabla \cdot \tau_g - \varepsilon_g \nabla P + \varepsilon_g \rho_g g - I$	[Eq. 17]
Fase sólido granular	$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s u_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s u_s) = \nabla \cdot \tau_s - \varepsilon_s \nabla P + \varepsilon_s \rho_s g + I$	[Eq. 18]
Taxa de intercâmbio de quantidade de movimento entre as fases, I	$I = \beta (u_g - u_s)$	[Eq. 19]
O tensor tensão viscosa da fase gasosa. (newtoniano)	$\tau_g = 2\mu S_g$	[Eq. 20]
Tensor de deformação, S_g . Onde δ é um tensor unitário	$S_g = \frac{1}{2} [\nabla u_g + (\nabla u_g)^r] - \frac{1}{3} \nabla u_g \cdot \delta$	[Eq. 21]

Viscosidade

Viscosidade de
Schaeffer (ANSYS,
2016b)

$$\mu_f = \begin{cases} \min\left(\frac{P_c \sin\phi}{2\sqrt{I_{2D}}}, \mu_s^{max}\right), & \varepsilon_g < \varepsilon^* \\ 0, & \varepsilon_g \geq \varepsilon^* \end{cases} \quad [\text{Eq. 22}]$$

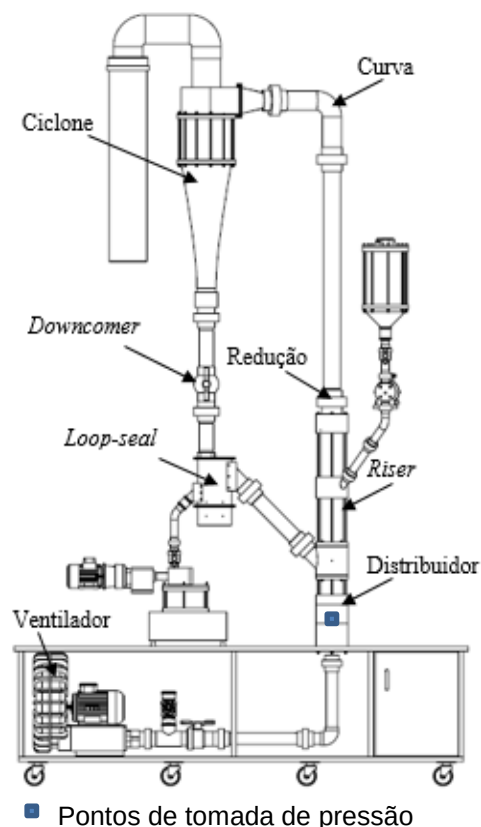
Pressão dos Sólidos

$$P_c = \begin{cases} 10^{24}(\varepsilon^* - \varepsilon_g)^{10}, & \varepsilon_g < \varepsilon^* \\ 0, & \varepsilon_g \geq \varepsilon^* \end{cases} \quad [\text{Eq. 23}]$$

3 RESULTADOS

Os testes experimentais foram realizados em uma bancada de leito fluidizado circulante, mostrada na Figura 4, adaptada para operar também em leito borbulhante. Para os testes foram posicionados dois transdutores de pressão diferenciais, um para a leitura de queda de queda de pressão na placa de orifício, calibrada a fim de fornecer a vazão de ar que alimenta o sistema, e outro transdutor de pressão que mede a diferença de pressão entre o plenum (equipamento antes distribuidor de ar que homogeneiza a velocidade) e o ambiente.

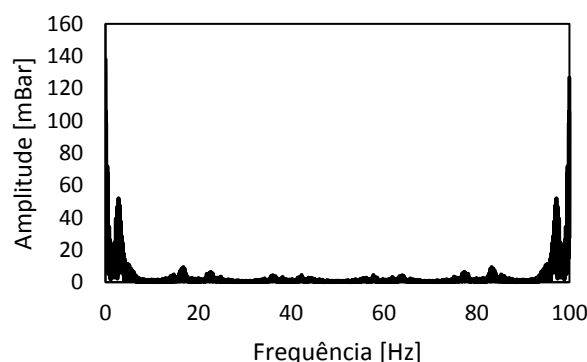
Figura 4 – Bancada para análise dinâmica de leitos fluidizados



A transformada rápida de Fourier (FFT) calcula a transformada discreta de Fourier (DFT) de uma sequência, de uma maneira mais eficiente, onde esse processo reduz o número de cálculos necessários de N pontos, de $2N^2$ para, $2N \ln N$. Essa análise de Fourier converte um sinal do seu domínio original (tempo ou espaço) para uma representação no domínio da frequência e vice-versa, como mostra na Figura 5

Para a análise dos dados de flutuação de pressão foi utilizado um algoritmo escrito para o software de computação numérica OCTAVE. Esse algoritmo tem como finalidade ler os dados de pressão obtido nos experimentos, e usá-los em uma função FFT, nativa do OCTAVE. Com isto, os dados de pressão são convertidos em sinais de frequência e amplitude, o que facilita a análise dos dados.

Figura 5 - Análise de fourier da EV2 em domínio de frequência e amplitude



Os testes foram realizados em diferentes velocidades: na velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), onde a fluidização é branda, 0,8 vezes a velocidade mínima de fluidização ($0,8U_{mf}$), onde se encontra um leito fixo e 1,5 vezes a velocidade mínima de fluidização ($1,5U_{mf}$), onde a fluidização movimenta mais o leito.

3.1 FLUTUAÇÃO DA PRESSÃO

A pressão é definida como:

$$P = \bar{P} + p, \quad [\text{Eq. 07}]$$

sendo P o valor da pressão, $\bar{P}$ o valor médio da pressão, e o p é o valor flutuante

Os dados coletados pelo transdutor de pressão nos mostram como a pressão em uma certa vazão oscila como mostra nas Figuras 6 e 7, ou seja, por mais que a vazão esteja constante sempre haverá uma oscilação de pressão dentro do leito.

Figura 6 – Valores experimentais da pressão dos testes experimentais para leito de EV2.

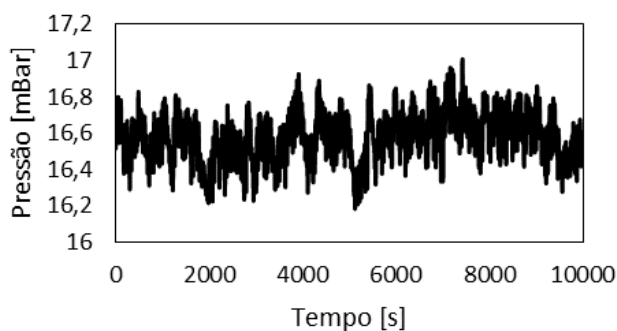
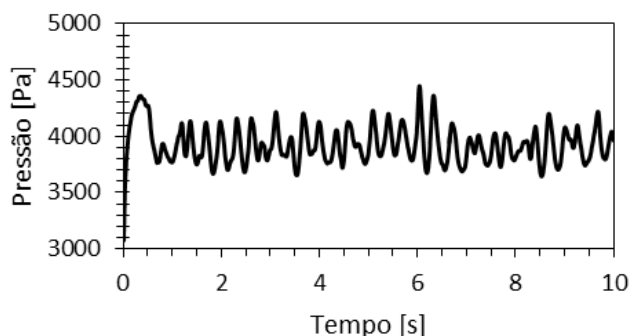


Figura 7 - Valores experimentais da pressão dos testes de simulação para leito de EV2.



3.2 ESPECTROGRAMAS PAR OS LEITOS FIXOS

Para a visualização dos domínios de frequência e amplitude foram utilizados uma função de plotagem 3D do OCTAVE. A função *surface* transforma os dados em um gráfico em três dimensões podendo assim ver a frequência pelo tempo com os picos de amplitude, caracterizando assim um espectrograma.

Em ambas as partículas, para velocidades abaixo da velocidade de mínima fluidização (U_{mf}) foi constatada uma baixa frequência característica, entre

0 a 1,5 Hz, e com baixa amplitude, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9.

Esse leito fixo é caracterizado por não haver movimento no leito. A queda de pressão é linear, a qualquer tempo, com relação à altura e, por não haver formação e bolhas ou estruturas que se alteram no tempo, a pressão se mantém praticamente estável. Pequenas flutuações podem ocorrer devido a instabilidades do equipamento e dos medidores.

Figura 8 - Espectrograma de leito fixo da esfera de vidro com velocidade abaixo da U_{mf}

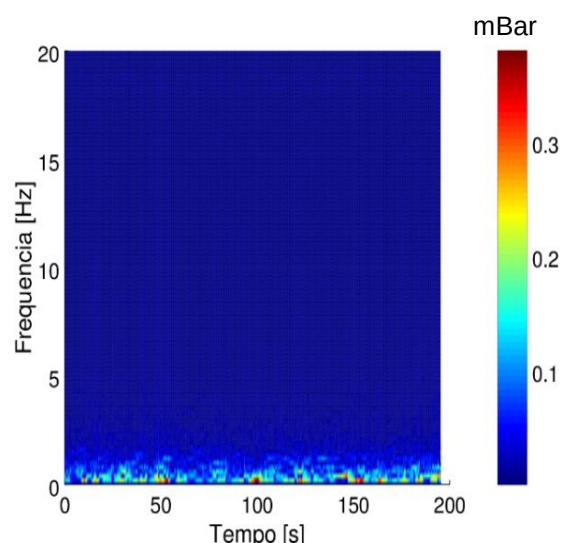
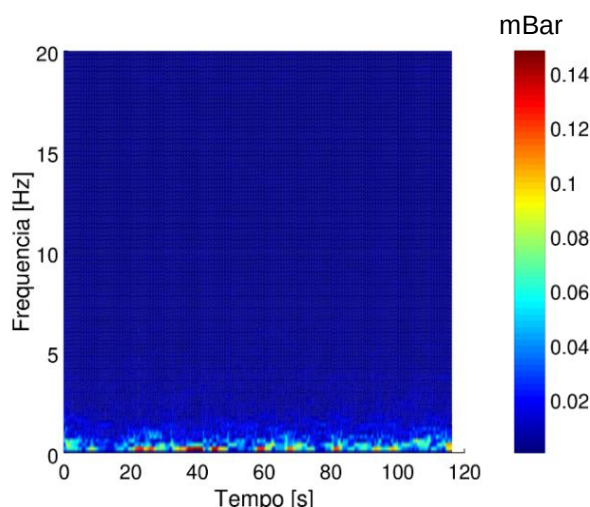


Figura 9 - Espectrograma de leito fixo da areia de fundição com velocidade abaixo da U_{mf}

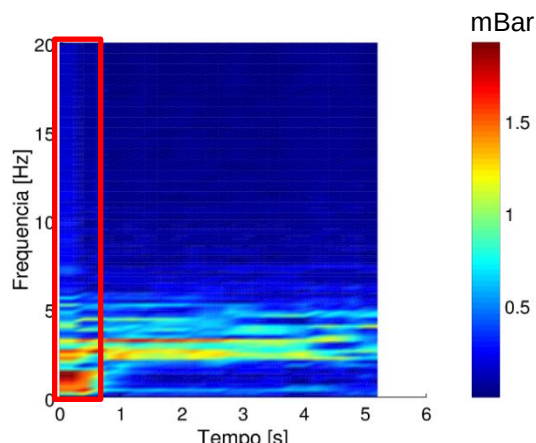


3.3 TRANSIÇÃO NAS SIMULAÇÕES

Nos espectrogramas das simulações, pode ser visto uma faixa no início da simulação, diferente do

que se é visto no restante, como mostra a Figura 10. Isto se deve ao fato de que os resultados da simulação estão ainda em transição.

Figura 10 – Espectrograma da transição na simulação com velocidade abaixo da U_{mf}



3.4 ESPECTROGRAMA EM MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO E BORBULHAMENTO

Com as partículas, foram feitos testes em leito fixo, em mínima fluidização e em leito borbulhante para, assim, pode ser comparada a diferença da frequência dominante para cada regime. Para cada faixa de vazão foi amostrado um tempo de 120 s, com dados de pressão a cada 0,01 s, totalizando 12000 dados de pressão.

Na partícula EV2, em sua mínima fluidização (U_{mf}) o resultado da flutuação da pressão pode ser visto com um pico próximo a 3 Hz com uma baixa amplitude, podendo, assim, caracterizar a mínima fluidização com uma alta frequência, mas, com uma baixa amplitude, Figura 12C. Já na simulação, ocorre quase o mesmo efeito, porém com amplitude maior, como mostra a Figura 12D.

Em estado de leito fluidizado borbulhante ($1,5 U_{mf}$), pode ser visto uma alta frequência, variando entre 3 e 4 Hz, e com uma alta amplitude, evidenciando uma maior formação de bolhas (Figura 12E). No entanto, sua simulação apresenta uma menor frequência, mas com uma alta amplitude (Figura 12F).

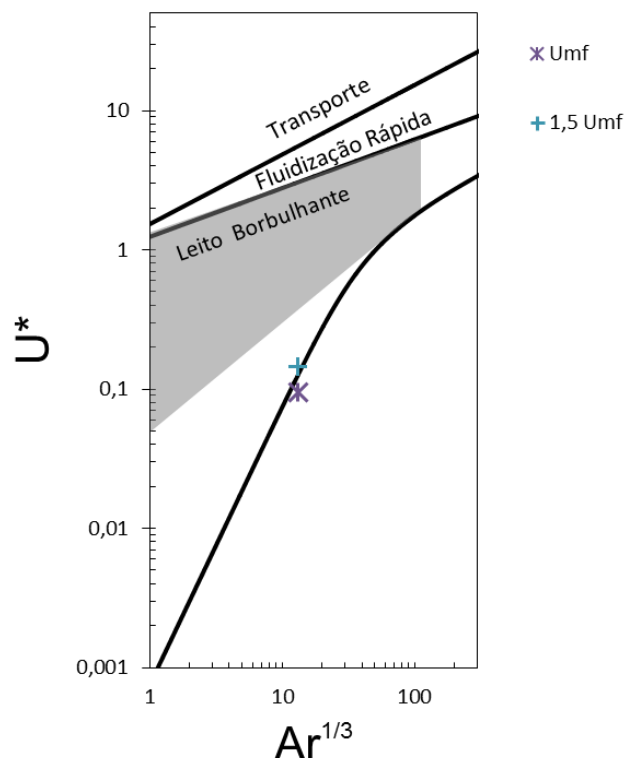
Para regime de leito fixo da AF1, há uma grande dispersão no gráfico que mostra o espectrograma (Figura 13A), não sendo observada uma frequência dominante. Diferente do experimento com a EV2 que somente apresenta uma faixa de baixa frequência e amplitude.

Nas Figuras 13C e 13D, é mostrado os espectrogramas experimental e simulado, respectivamente, para a partícula AF1 em velocidade mínima de fluidização. O comportamento segue o esperado: vê-se apenas picos em baixa frequência. Em 2 momentos, aparecem ainda picos menores em frequência próximo a 3 Hz.

Com velocidade 50% maior que a velocidade mínima de fluidização ($1,5 U_{mf}$), seu espectrograma apresenta resultados com baixa frequência e amplitude, Figura 13E e 13F.

Nas Figuras 13C e 13E, pode-se perceber pouca diferença entre os espectrogramas em velocidade de mínima fluidização e velocidade 1,5 vezes a mínima fluidização, isso se dá pelo fato de que, mesmo aumentando a velocidade para $1,5 U_{mf}$, o regime de fluidização é brando, com pouca movimentação. A Figura 11 mostra como esta vazão ainda é próxima à velocidade de mínima fluidização. A Figura 11 ainda sugere operações com $3,5 U_{mf}$, que não foi possível reproduzir no equipamento, devido ao limite da diferença de pressão medida na placa de orifício utilizada para medição de vazão.

Figura 11 - Mapa de regimes para a areia de fundição



Fonte: Adaptado de Grace (1997)

Figura 12 - Espectrogramas dos resultados dos testes experimentais – $A=0,8 U_{mf}$, $C= U_{mf}$, $E=1,5 U_{mf}$ – e simulações – $B=0,8 U_{mf}$ $D= U_{mf}$ $F=1,5 U_{mf}$ – da esfera de vidro.

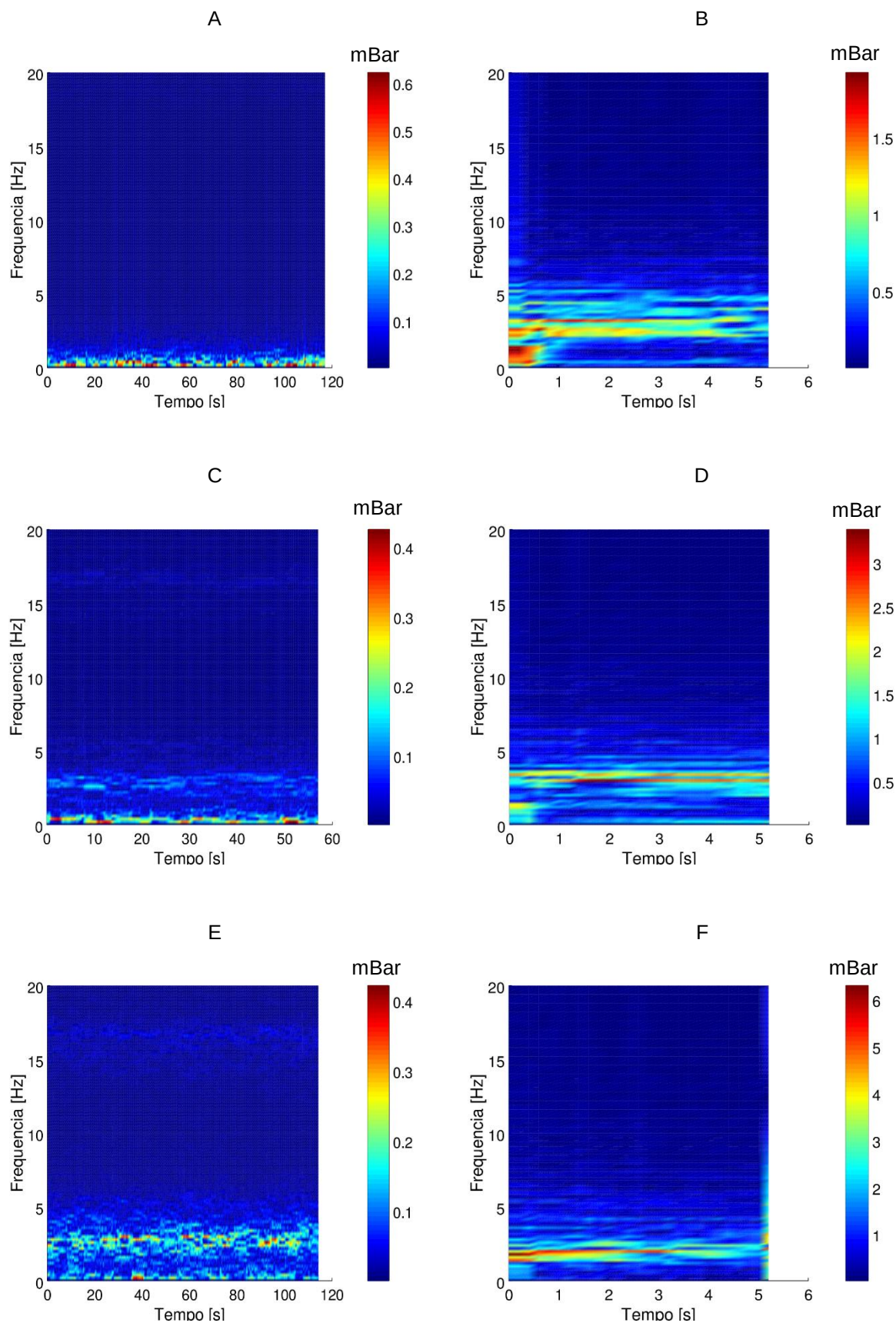
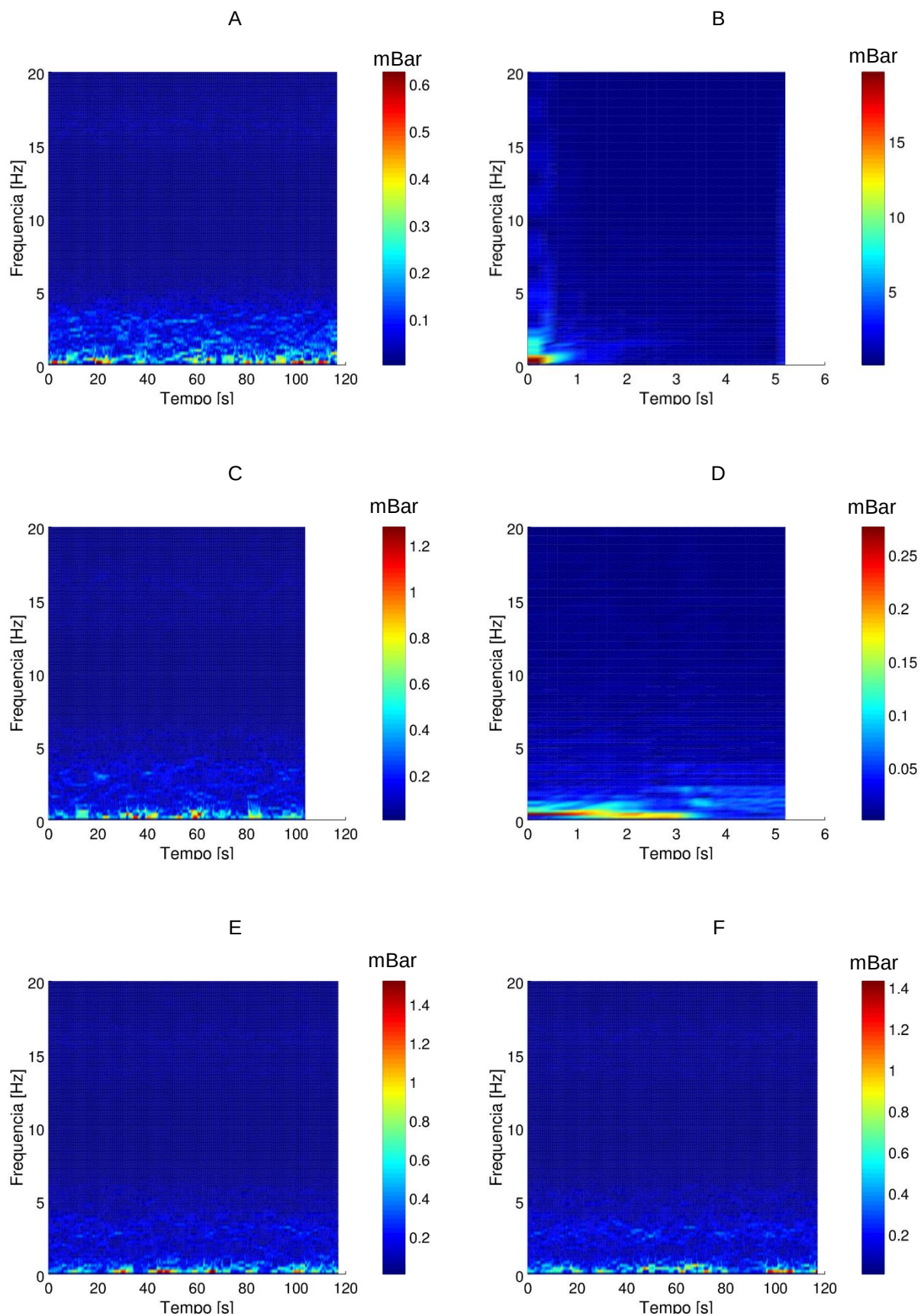


Figura 13 - Espectrogramas dos resultados dos testes experimentais – $A=0,8 U_{mf}$, $C= U_{mf}$, $E=1,5 U_{mf}$ – e simulações – $B=0,8 U_{mf}$ $D= U_{mf}$ $F=1,5 U_{mf}$ – da areia de fundição.



4 CONCLUSÃO

Nesse trabalho pode ser observado as características de frequência e amplitude de um leito fluidizado circulante em seus diversos regimes. Com a análise dos dados de flutuação de pressão efetuados tanto experimentalmente em uma e bancada de leito fluidizado circulante, quanto em computação numérica, foi possível identificar as características de cada regime.

Para a esfera de vidro (EV2), em velocidades menores ($0,8 U_{mf}$) pode ser observado baixas frequências variando entre 0 e 1,5 Hz, e com baixa variação de sua amplitude. No entanto, em velocidades de mínima fluidização (U_{mf}), foi possível se notar uma frequência entre 0 e 1,5 Hz com uma amplitude baixa e uma pode-se notar também uma pequena faixa de frequência em 3 Hz. Para velocidade maior ($1,5 U_{mf}$), pode-se notar uma frequência variando de 3 a 4 Hz e com uma amplitude maior.

Os testes realizados na partícula menor (AF1) ficaram inconclusivos pelo fato de que, com $1,5 U_{mf}$, não se pode alcançar um regime mais agitado, pelo fato de que $1,5 U_{mf}$ fica muito perto da velocidade mínima de fluidização causando assim com que os espectrogramas ficassem com frequências e amplitudes parecidas.

5 REFERÊNCIAS

- ANSYS Fluent User's Guide. Versão 17.2. 2016a . CD-ROM.
- ANSYS Fluent. Theory Guide 17.2. Ansys Inc. USA, 2016b.
- BENDAT, J. S.; PIERSON, A. G. Random Data, Analysis and Measurement Procedures. 2nd ed., **John Wiley and Sons**, p. 566, 1986.
- CAVALCANTI, Danilo Emídio de Souza. **Estudo fluidodinâmico computacional de um forno piloto rotativo contínuo a gás natural para produção de gesso beta**. 2013, p. 87, Dissertação (Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- EATON, John W. et al. **GNU Octave**. Versão 4.2.1. 2017. CD-ROM.
- FALKOWSKI, D.; BROWN, R.C. **Analysis of Pressure Fluctuations in Fluidized Beds**. v. 43, n. 18, p. 5721–5729, 2004.
- Fan, L.T.; Ho, T.C.; Hiraoka, S. Pressur Fluctuations in a Fluidized Bed, **AIChE Journal**, 27, p. 388, 1981.
- GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, v. 7, p. 55-86, 1973.
- GOLDEMBERG, José. Biomassa e energia. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 582-587, janeiro 2009.
- GRACE, J. R. Introduction to circulating fluidized beds. In: GRACE, J.R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. **Circulating Fluidized Beds**. Blackie Academic & Professional, 1997. cap. 1, p. 5-13.
- KAGE, Hiroyuki et al. Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. **Advanced Powder Technology**, v. 11, n. 4, p. 459-475, 2000.
- KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. Boston, 1991
- NIZ, Anderson . **Leito Fluidizado**. 1. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/AndersonNiz/leito-fluidizado>>. Acesso em: 22 mar. 2017.
- SYAMLAL, M.; O'BRIEN, T. J.. A Generalized drag correlation for multiparticle systems. **Morgantown Energy Technology Center DOE Report**, 1987.
- VERLOOP, J.; HEERTJES, P. **Periodic pressure fluctuations in fluidized beds**. Chem. Eng. Sci. 29, 1035–1042. 1974