

FLUIDODINÂMICA DE PARTÍCULAS DE PEBD/AL E AREIA EM LEITO FLUIDIZADO

T. M. FREITAS¹, P. G. PEREIRA², M. S. BACELOS^{1*}

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de pós-graduação em Energia

²Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharias e Tecnologia
*e-mail: marcelo.bacelos@ufes.br

RESUMO

No cenário atual da indústria em que é visado o máximo aproveitamento energético em rotas de recuperação de resíduos sólidos, a pirólise é uma técnica que se destaca. No âmbito dos resíduos cartonados, esta tecnologia é a única que permite recuperação do alumínio, e por isso, este método propicia a redução da extração de alumínio do minério da bauxita para produção de novas embalagens. Em larga escala de produção, o reator de leito fluidizado torna-se uma alternativa promissora de sistema de contato gás-sólido para pirólise de composto PEBD/Al. Entretanto, ainda é necessária uma maior compreensão da fluidodinâmica do leito fluidizado composto por composto PEBD/Al. Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar a fluidodinâmica de partículas de composto PEBD/Al e de areia em leito fluidizado de maneira a contribuir com a aplicação deste tipo de reator na pirólise de resíduos cartonados. Para isto, ensaios fluidodinâmicos são realizados para obtenção de dados experimentais de queda de pressão em função de velocidades crescentes e decrescentes e de altura do leito. Com base na análise dos dados de desvio padrão de queda de pressão no leito em função da velocidade do ar, podem-se identificar os seguintes regimes de escoamento, visualizados na parede da coluna: regime de leito fixo, leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado turbulento.

1 INTRODUÇÃO

As embalagens cartonadas são amplamente utilizadas nos dias atuais por garantir a conservação de alimentos por períodos prolongados de tempo, sem necessidade de refrigeração, devido à sua estrutura de composto laminar formado por polietileno, alumínio e papel, que evita o contato do alimento com microrganismos, oxigênio e luz (NASCIMENTO et al., 2007; TETRA PAK, 2014). O descarte inadequado das embalagens cartonadas gera grandes

impactos ambientais em detrimento da difícil desagregação e degradação dos materiais constituintes em condições naturais.

Em 2013, 12 bilhões de embalagens cartonadas foram consumidas e apenas 29% foram recicladas (CEMPRE, 2013), indicando que o reaproveitamento desses resíduos no Brasil é menor quando comparado a outros tipos de materiais, tais como as latas de alumínio, cuja porcentagem de reciclagem é de 97,9% (ABAL, 2014). Diante disso, observa-se a importância do estudo e

aprimoramento de rotas para a recuperação destes resíduos.

Dentre as técnicas de recuperação das embalagens cartonadas podemos destacar: 1) a incineração, alternativa muito utilizada em países europeus que visa à utilização da energia da queima; 2) a pirólise que permite a completa separação das camadas constituintes; e 3) a recuperação do compósito polietileno-alumínio (PEBD/Al) para a obtenção de outros produtos como placas, telhas e artigos de escritório (CEMPRE, 2014; NEVES, 1999).

A pirólise de resíduos cartonados é uma tecnologia recente e vem sendo estudada por diversos pesquisadores. Wu e Chang (2001), Korkmaz et al. (2009) e Alvarenga (2013) observaram, a partir de estudos sobre pirólise de embalagens cartonadas em atmosfera inerte, que os produtos do processo são alumínio com alto grau de pureza, parafina, carvão e cinzas. Entretanto, é possível pirolisar somente o compósito formado pelo polietileno e alumínio, visto que o papel é facilmente separado das embalagens e já encontra o mercado de reciclagem bem desenvolvido.

Como visto, a pirólise de resíduos cartonados é um procedimento inovador e limpo, por ser o único a possibilitar a separação entre o polietileno e as lâminas de alumínio. Esse fato garante um maior aproveitamento energético como consequência da redução do consumo de energia e da diminuição da extração de matérias-primas para produção de novas embalagens.

Para este processo pirolítico, reatores de contato entre as partículas cartonadas e o fluido de aquecimento são empregados a fim de se garantir maiores áreas de contato seguidas de altas taxas de transferência de calor e massa.

Diferentes tipos de reatores foram desenvolvidos baseados no sistema de contato gás-sólido. Os principais reatores possíveis de

serem empregados neste processo são os reatores de leito fluidizado, de leito de jorro e de tambor rotativo que utiliza o plasma térmico.

Segundo Béttega, Corrêa e Freire (2009), o aumento de escala do leito de jorro ainda limita a aplicação deste equipamento para utilização industrial, assim, a depender da quantidade a ser processada, este equipamento torna-se inviável. Já o leito fluidizado e o de tambor com plasma térmico não apresentam este problema, entretanto, este último, requer altos investimentos.

Leitos fluidizados são largamente empregados em processos industriais por proporcionarem uma mistura intensa entre as fases fluida e particulada, ocasionando taxas elevadas de transferência de calor e massa e uniformidade de distribuição de temperatura no interior do equipamento. Exemplos típicos de aplicações industriais do leito fluidizado incluem combustão e gaseificação de carvão, reações catalíticas, secagem de sólidos, recobrimento e granulação de sólidos, dentre outros. (CREMASCO, 2012).

O conhecimento da fluidodinâmica das partículas no leito fluidizado é de suma importância para uma operação desejável do mesmo. Almeida e Rocha (2002); Ambrosio-Ugri e Taranto (2004); Freire, Pires e Freire (2008); Oliveira, Cardoso e Ataíde (2013) e Girimonte e Vivacqua (2013), investigaram o comportamento de diversos sólidos em leitos fluidizados a partir da análise de dados de queda de pressão em função da velocidade de escoamento do ar.

Daleffe e Freire (2004) e Felipe e Rocha (2007) exploraram o desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade para leitos fluidizados. Estes diagramas permitem obter algumas informações fluidodinâmicas difíceis de serem obtidas em curvas características. Flutuações na pressão também podem ser usadas para caracterizar a transição de regimes de fluidização como foi demonstrado por Bi e Grace (1995), Kage et

al. (2000), Chen e Bi (2003) e Felipe e Rocha (2004).

Neste contexto, o presente estudo tem como finalidade analisar a fluidodinâmica de partículas de compósito PEBD/Al e de areia em leito fluidizado de maneira a contribuir com a aplicação deste tipo de reator na pirólise de resíduos cartonados. Para atingir tal objetivo, primeiramente, é efetuada a caracterização das partículas envolvidas na pirólise. Em seguida, ensaios fluidodinâmicos são realizados para obtenção de dados de queda de pressão em função da velocidade do ar. A determinação dos regimes de escoamento é feita pela análise do desvio padrão da queda de pressão no leito.

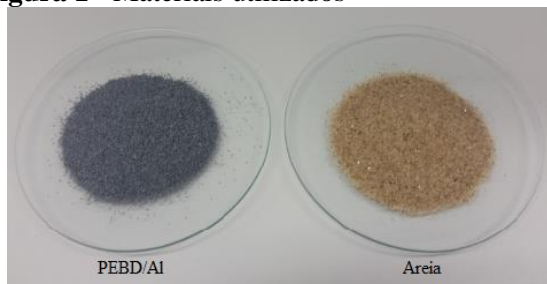
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Dois diferentes tipos de partículas são utilizados nos ensaios fluidodinâmicos: o resíduo cartonado, material que se deseja recuperar; e a areia, material inerte comumente utilizado em reatores de leito fluidizado por fornecer estabilidade ao processo além de melhorar a transferência de calor do mesmo.

O resíduo cartonado, disponibilizado pela Tetra Pak, consiste em pellets de compósito PEBD/Al com diâmetro de 2,58 mm. Para seu processamento em leito fluidizado torna-se necessário a redução de tamanho e para isso, a amostra é moída utilizando um moinho de facas. A Figura 1 apresenta os materiais em questão.

Figura 1 - Materiais utilizados



Fonte: Autor (2015).

2.2 Caracterização das partículas

A caracterização das partículas é realizada através de técnicas analíticas de modo a determinar as seguintes propriedades físicas: massa específica, diâmetro médio de partícula, porosidade e esfericidade.

A massa específica é obtida pelo método da picnometria. O picnômetro, já calibrado com água destilada, é preenchido com a amostra até aproximadamente ¼ de seu volume e tem sua massa determinada utilizando uma balança analítica. Em seguida, o volume do picnômetro é preenchido com um fluido – água para areia e querosene para o compósito – e sua massa também é registrada. As bolhas de ar são retiradas com o uso do banho ultrassônico. A massa específica da amostra é então calculada pela seguinte Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V_{pic} - V_f} \quad (1)$$

em que m é a massa da amostra, V_{pic} é o volume do picnômetro e V_f é o volume de fluido adicionado, que pode ser obtido com o auxílio de sua massa específica.

O diâmetro médio das partículas é obtido através da técnica de peneiramento. Um conjunto de peneiras Tyler Bertel com aberturas distintas de 850, 710, 600, 500 e 425 μm é utilizado. Agita-se a amostra com o auxílio de uma base vibratória por um intervalo de tempo suficiente até que se obtenha massa constante em cada peneira. A peneira em que uma maior fração de partículas fica retida é a escolhida e o diâmetro da partícula é obtido pela média aritmética entre a abertura da peneira anterior e a escolhida.

A porosidade do leito de partículas é determinada através do método da proveta. O método consiste em preencher uma proveta com a amostra e registrar a massa. A porosidade é então obtida pela Equação 2 a seguir.

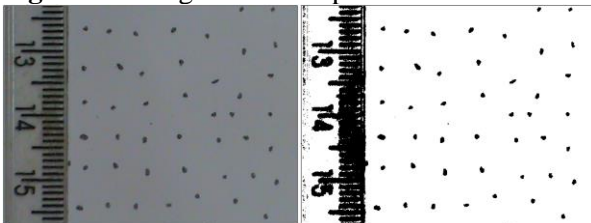
$$\varepsilon = \frac{V - V_p}{V} \quad (2)$$

em que ε é a porosidade do leito, V é o volume da proveta e V_p é o volume de partículas adicionadas que pode ser calculada pela razão entre sua massa medida e massa específica.

A esfericidade das partículas é obtida através de uma metodologia de análise de imagens utilizando o software livre ImageJ desenvolvido no *National Institute of Health* dos EUA. Opta-se por esta metodologia uma vez que as partículas possuem formatos irregulares. Para isto, uma amostra de cada material, previamente quarteada, contendo 100 grãos é fotografada em uma superfície luminosa. São necessárias até quatro fotos diferentes de cada amostra para que os 100 grãos sejam fotografados com boa definição de maneira que cada grão esteja isolado dos demais.

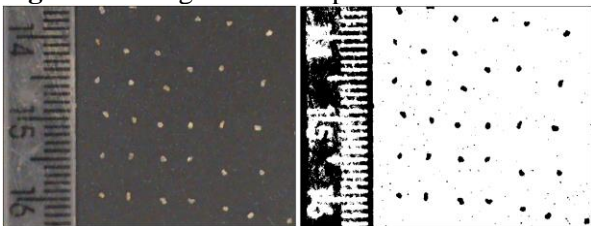
As imagens obtidas são então processadas no programa. Primeiramente calibra-se a escala com auxílio da régua disposta na foto, e em seguida, a imagem é transformada em binária. As Figuras 2 e 3 a seguir apresentam as imagens obtidas para o compósito PEBD/Al e areia respectivamente.

Figura 2 - Imagens obtidas para o PEBD/Al



Fonte: Autor (2015).

Figura 3 - Imagens obtidas para a areia



Fonte: Autor(2015).

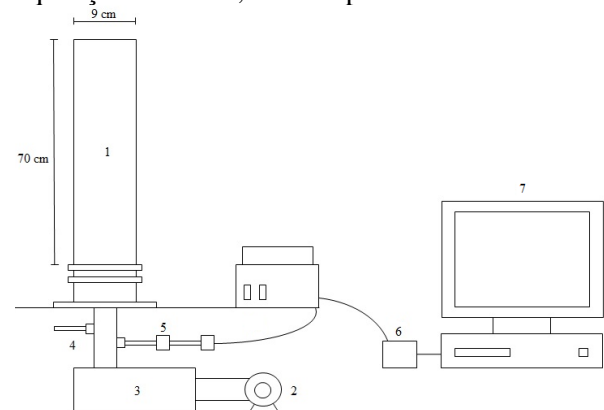
Os grãos são selecionados e, através dos descritores de forma dispostos no menu *Analyze Particles*, os parâmetros das partículas podem ser calculados. Neste caso, o parâmetro de interesse é a relação de aspecto que é similar ao grau de alongamento (Al) que mede a razão do diâmetro circunscrito pelo inscrito, obtido pela projeção da sombra das partículas no plano. De acordo com Peçanha e Massarani (1986) a esfericidade pode ser obtida pela Equação 3 a seguir.

$$\phi = \frac{1}{Al} \quad (3)$$

2.3 Unidade Experimental

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios fluidodinâmicos é um leito fluidizado com uma coluna cilíndrica de vidro, de propriedade do PPGEN/CEUNES/UFES. Uma representação esquemática do leito fluidizado e seus periféricos é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Unidade experimental: 1 – coluna cilíndrica de vidro, 2 – soprador, 3 – aquecedor, 4 – termopar, 5 – transdutor de pressão, 6 – placa de aquisição de dados, 7 – computador



Fonte: Autor (2015).

O leito é equipado com um soprador centrífugo IBRAM de 2 CV de potência e vazão máxima de ar de 4,5 m³/min. Um sistema de aquecimento de ar com controle de temperatura também se encontra disponível próximo à saída do soprador. Para o

monitoramento da pressão, um transdutor de pressão Dwyer 616C-4 (faixa de operação de 0 a 4981 Pa, com precisão de 1%) está localizado na tubulação de entrada de ar, ou seja, pouco abaixo da câmara cilíndrica.

Por fim, para que a aquisição de dados seja efetuada, um computador (Core i3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM) é acoplado a uma placa de aquisição de dados A/D (analogico/digital) da *National Instruments* que está interligada ao leito fluidizado.

2.4 Ensaios fluidodinâmicos

Inicialmente, a câmara cilíndrica é preenchida com um dos tipos de partículas (compósito PEBD/Al ou areia) até uma altura de 16 cm. Em seguida, aciona-se o soprador possibilitando que o ar seja injetado no leito. A vazão de ar é aumentada manualmente, no painel do equipamento, através de um inversor de frequência da WEG modelo CFW – 08.

Para cada velocidade de ar a ser analisada, dados de queda de pressão correspondentes são obtidos. O transdutor de pressão diferencial capta o sinal analógico do leito, e os mesmos são endereçados a uma placa de aquisição de dados A/D. Uma frequência de amostras de queda de pressão igual a 256 pontos por segundo são armazenados. A comunicação entre a placa e o computador via USB permite que os dados de queda de pressão no leito sejam processados em um microcomputador por um programa de aquisição de dados, desenvolvido em linguagem de programação gráfica utilizando o Labview 10.0.

Determina-se a curva característica do leito fluidizado em duas etapas: primeiramente aumentando-se a velocidade do ar no leito até a obtenção de um regime de fluidização turbulento, e em seguida, reduzindo-se a mesma ao valor de leito fixo. Neste procedimento, para cada velocidade analisada, um conjunto de 1024 dados de queda de pressão é registrado durante 4

segundos. Com a média e o desvio padrão dos dados de queda de pressão as curvas são obtidas.

A altura do leito para cada regime de escoamento também é registrada, e a mesma é obtida visualmente com o auxílio de um papel milimetrado, fixado na parede externa da coluna cilíndrica. Observa-se a altura máxima e mínima que o leito de partículas atinge para cada velocidade. Dessa maneira, para cada altura média atingida pelas partículas no leito, o volume do mesmo é correspondente a Equação 4.

$$V = A_b H_{\text{média}} \quad (4)$$

em que A_b é a área da seção transversal do leito e $H_{\text{média}}$ é a média aritmética das alturas máximas e mínimas observadas.

Assim, a porosidade do leito, a cada instante, pode ser calculada pela Equação 2, sendo, neste caso, V o volume do leito dada pela Equação 4.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das partículas

A Tabela 1 exhibe as propriedades físicas calculadas para cada partícula em estudo seguindo a metodologia descrita no item 2.2.

Tabela 1- Caracterização das partículas.

	ρ (kg/m ³)	d (μm)	ϵ	ϕ
PEBD/Al	1038 ± 9	550,0	0,55 ± 0,01	0,7 ± 0,1
Areia	2567 ± 30	462,5	0,47 ± 0,01	0,7 ± 0,1

Fonte: Autor (2015).

Como uma aproximação, com os dados de massa específica e diâmetro médio pode-se classificar as partículas de acordo com o diagrama proposto por Geldart (1973) para partículas esféricas. Ambos materiais estudados são classificados como partículas do grupo B, e por isso, não apresentam a expansão do leito na velocidade de mínima

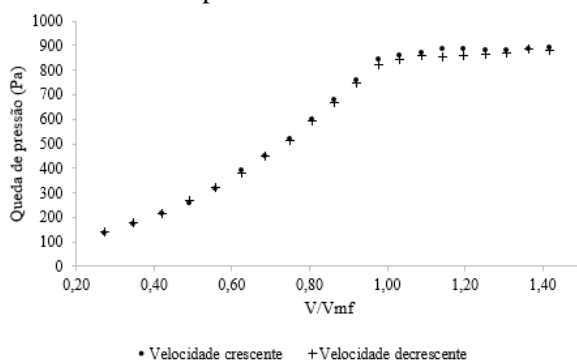
fluidização que é acompanhada pela formação de bolhas.

Com a análise de imagens das partículas é possível concluir que as esfericidades dos materiais em estudo são semelhantes.

3.2 Ensaios fluidodinâmicos

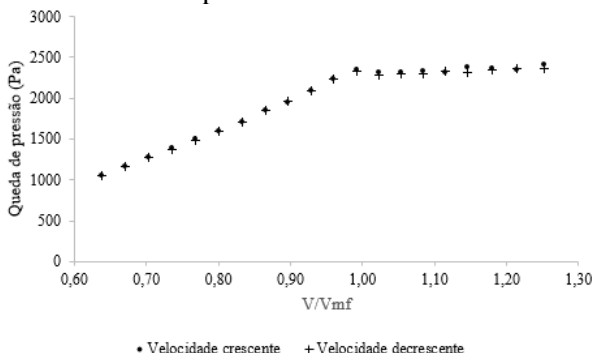
A Figura 5 apresenta os dados de queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito preenchido com 16 cm de PEBD/Al. Observa-se que a queda de pressão aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade do ar até que o regime de fluidização se estabeleça. A partir deste ponto, o aumento na velocidade do ar acarreta pequenas alterações na queda de pressão.

Figura 5 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito de PEBD/Al



Fonte: Autor (2015).

Figura 6 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para o leito de areia



Fonte: Autor (2015).

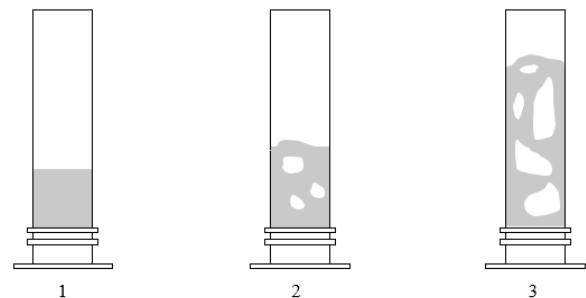
O mesmo comportamento é observado para o leito de areia, conforme disposto na

Figura 6, e este perfil está em conformidade com a curva característica de leitos fluidizados disposta na teoria.

Para sistemas de contato gás-sólido existem alguns regimes distintos de fluidização que podem ser observados experimentalmente: leito fixo, fluidização particulada, borbulhante, turbulenta e rápida. Nem todos fenômenos são observados em determinados sistemas visto que estes dependem das dimensões dos equipamentos utilizados e do material particulado em questão (Yang, 2003).

Observa-se visualmente que, para ambos materiais, ao ser atingida a velocidade de mínima fluidização, o regime se altera de leito fixo para leito borbulhante, o que é o esperado por se tratar de partículas do grupo B de Geldart. Aumentando-se pouco mais a velocidade, nota-se que o leito adquire a característica de regime turbulento. A Figura 7 ilustra os comportamentos observados.

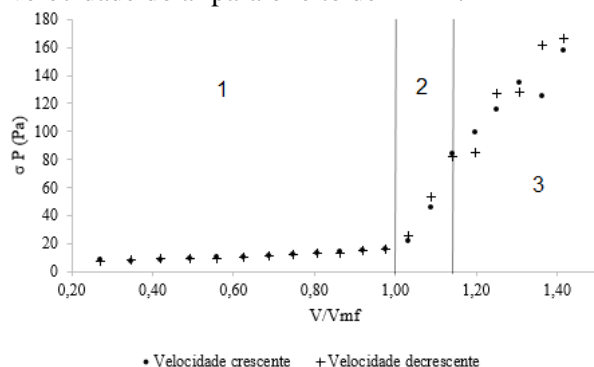
Figura 7 - Regimes de fluidização: 1 - leito fixo, 2 - fluidização borbulhante, 3 - fluidização turbulenta



Fonte: Autor (2015).

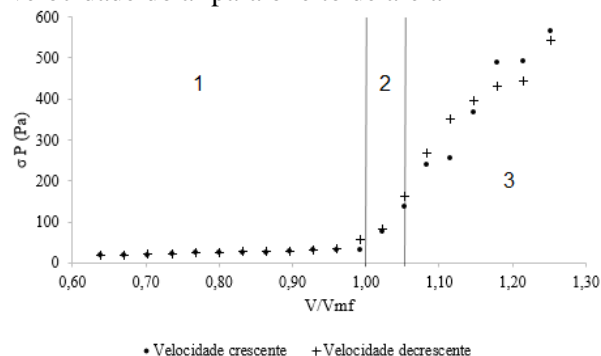
As Figuras 8 e 9 exibem os dados do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade para o leito composto por PEBD/Al e areia, respectivamente. Uma análise destes gráficos também possibilita identificar, de maneira clara, os tipos de regime de fluidização existentes.

Figura 8 - Desvio padrão em função da velocidade do ar para o leito de PEBD/Al



Fonte: Autor (2015).

Figura 9 - Desvio padrão em função da velocidade do ar para o leito de areia



Fonte: Autor (2015).

De acordo com as figuras, três regiões distintas são observadas e numeradas de 1 a 3.

A primeira, até a v_{mf} , é característica de leito fixo pois a pressão flutua pouco, estando abaixo do limite da precisão do transdutor de pressão, que é de aproximadamente 50 Pa.

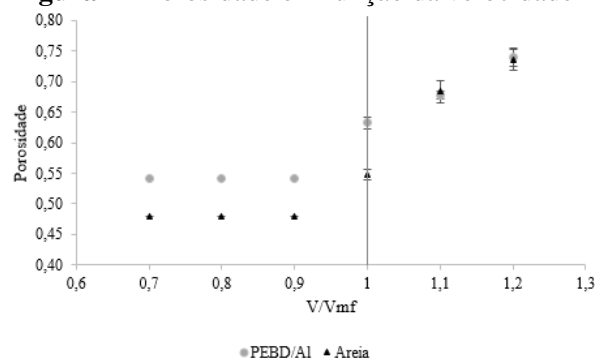
Acima da v_{mf} nota-se duas regiões distintas com tendências lineares: a 2, que possui um coeficiente angular maior, e a 3, com uma menor inclinação. Na região 2, o regime de fluidização é o de bolhas, e a medida que a velocidade aumenta mais bolhas são formadas afetando de maneira progressiva a medida de pressão. Em 3, o regime é o turbulento, e as bolhas desordenadas, e cada vez maiores, afetam mais significativamente a medida de pressão.

Como visto, na fluidização, as instabilidades, devido ao movimento de

partículas, geram flutuações na queda de pressão que se tornam mais evidenciadas em maiores velocidades (DALEFFE E FREIRE, 2004).

A Figura 10 apresenta os dados de porosidade do leito para valores crescentes da velocidade.

Figura 4 - Porosidade em função da velocidade



Fonte: Autor (2015).

Como observado, na Figura 10, na região de leito fixo, a porosidade do leito se mantém constante até que o regime de fluidização ocorra, apresentando valores crescentes à medida que a velocidade ascende. Isso ocorre porque no leito fixo a permeabilidade é constante e já no regime de fluidização, com a expansão do leito, o mesmo se torna mais permeável ao escoamento do ar, aumentando gradativamente a fração de vazios. O aumento da porosidade é mais acentuado para o leito de areia, e é observado visualmente que este leito apresenta mais espaços vazios com o aumento da velocidade. Além disso, a partir de v/v_{mf} maior que 1,1, nota-se que ocorre uma flutuação significativa na medida da porosidade, visto que há uma maior dispersão nos dados das medidas de altura de leito de partículas.

4 CONCLUSÕES

Com a análise dos dados experimentais coletados nesta pesquisa é possível concluir que:

- a metodologia de análise de flutuação da queda de pressão no leito é adequada para identificar os regimes de escoamento atingidos pelo leito fluidizado.
- nas condições operacionais utilizadas os regimes de escoamentos presentes na fluidização de partículas de PEBD/Al e areia são: leito fixo, fluidizado borbulhante e fluidizado turbulento.

NOMENCLATURA

A_b	Área da seção transversal do leito (m^2)
Al	Grau de alongamento
d	Diâmetro médio das partículas (μm)
$H_{média}$	Altura média (cm)
m	Massa (kg)
P	Pressão (Pa)
v	Velocidade (m/s)
v_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
V	Volume (m^3)
V_f	Volume de fluido (m^3)
V_p	Volume de partículas (m^3)
V_{pic}	Volume do picnômetro (m^3)

Símbolos gregos

ϵ	Esfericidade
ρ	Massa específica (kg/m^3)
Φ	Porosidade
σ	Desvio padrão

Abreviaturas

PEBD/Al	Polietileno de baixa densidade - alumínio
---------	---

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.645-652, 2002.

ALVARENGA, L. M. **Pirólise de resíduos de embalagens cartonadas e seus componentes puros: uma avaliação cinética**. 2013. 109 p. Dissertação (Mestrado – Programa de pós-graduação em energia) Centro Universitário Norte do Espírito Santo, UFES. São Mateus, 2013.

AMBROSIO-UGRI, M. C. B. TARANTO, O. P. Estudo fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo. **Acta Scientiarum Technology**, v.26, n.1, p.53-57, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL) – RECICLAGEM NO BRASIL. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/reciclagem-no-brasil/>>. Acesso em: 18 ago 2014.

BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Scale-up study of spouted beds using computational fluid dynamics. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, p. 193-203, 2009.

BI, H. T.; GRACE, J. R. Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization. **The Chemical Engineering Journal**, v.57, p.261-271, 1995.

CEMPRE – CEMPRE REVIEW 2013. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/download/CEMPRE_review_2013.pdf>. Acesso em 10 jun de 2014.

CEMPRE – FICHAS TÉCNICAS / EMBALAGEM CART LONGA VIDA. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/ft_longavida.php>. Acesso em 10 jun de 2014.

CHEN, A.; BI, H. T. Pressure fluctuations and transition from bubbling to turbulent

fluidization. **Powder Technology**, v.133, p.237-246, 2003.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo, Blucher, 2012.

DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.21, n.1, p.35-46, 2004.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Prediction of minimum fluidization velocity of gas-solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements — Analysis of the standard deviation methodology. **Powder Technology**, v.174, p.104-113, 2007.

FELIPE, C. A. S.; ROCHA, S. C. S. Time series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.21, n.3, p.497-507, 2004.

FREIRE, F. B.; PIRES, E. C.; FREIRE, J. T. Influência da imobilização de biomassa e do tamanho da partícula na fluidodinâmica de um reator anaeróbio de leito fluidizado. **Acta Sci. Technol.** v.30, n.1, p.73-81, 2008.

GELDART, D. Types of Gas Fluidization. **Powder Technology**, v.7, p.285-292, 1973.

GIRIMONTE, R.; VIVACQUA, V. Design criteria for homogeneous fluidization of Geldart's class b solids upward through a packed bed. **Powder Technology**, v.249, p.316-322, 2013.

KAGE, H.; AGARI, M.; OGURA, H.; MATSUNO, Y. Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. **Advanced Powder Technol.**, v.11, n.4, p.459-475, 2000.

KORKMAZ, A.; YANIK, J.; BREBU, M.; VASILE, C. Pyrolysis of tetra pak. **Waste Management**, v. 29, n. 11, p. 2836-2841, 2009.

NASCIMENTO, R. M. M.; VIANA, M. M. M.; SILVA, G. G.; BRASILEIRO, L. B. Embalagem cartonada longa vida: Lixo ou luxo? **Química Nova Escola**, 2007.

NEVES, F.L. Reciclagem de Embalagens Cartonadas Tetra Pak. **O Papel**, p. 38-45, 1999.

OLIVEIRA, T. J. P.; CARDOSO, C. R.; ATAÍDE, C. H. Bubbling fluidization of biomass and sand binary mixtures: Minimum fluidization velocity and particle segregation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.72, p.113-121, 2013.

PEÇANHA, R. P., MASSARANI, G. Dimensão Característica e Forma de Partículas. **Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**, Campinas, p.302-312, 1986.

TETRA PAK – Protege o que é bom - 2014. Disponível em: <http://www.tetrapak.com/br/reciclagem/ciclo-de-vida-da-embalagem/mat%C3%A9ria-prima>. Acesso em 05 ago. 2014.

WU, C. H.; CHANG, H. S. Pyrolysis of tetra pack in municipal solid waste. **Journal Chemical Technology and Biotechnology**, v. 76, n. 8, p. 779-792, 2001.

YANG, W. C. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particles Systems**. New York: Marcel Decker Inc., 2003.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo suporte financeiro e à empresa Tetra Pak pelo fornecimento das amostras de resíduos cartonados.