

ANÁLISE DA CINÉTICA DE ATRIÇÃO DE PARTÍCULAS ESFÉRICAS NO LEITO DE JORRO CONVENCIONAL

R.C. SOUSA¹, F.B. FREIRE¹ e J.T. FREIRE¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: freire@ufscar.br

RESUMO – O presente trabalho teve como objetivo analisar, a partir de resultados experimentais e de simulação, o comportamento da cinética de atrição em função de diferentes condições operacionais. Assim, foram utilizadas esferas de vidro e de alumina com diâmetro médio igual a 3,2 e 3,0mm, respectivamente e um leito de jorro com 192mm de diâmetro e a entrada de ar de 30mm de diâmetro. Para a análise experimental da cinética de atrito, utilizou-se o método gravimétrico. Os dados obtidos foram verificados com os simulados através do modelo de Gwyn, (1969) e de Lee *et al.* (1993), nas mesmas condições operacionais. Os resultados experimentais mostraram a partir da cinética de atrição que o peso dos sólidos reduziu ao longo do tempo. Pela cinética de atrição observou-se que o desgaste do material particulado foi menor para a menor velocidade do ar de entrada, como esperado. Os valores experimentais apresentaram boas concordâncias com os preditos pelos modelos de Gwyn, (1969) e de Lee *et al.* (1993).

1. INTRODUÇÃO

O leito de jorro apresenta um contato sólido-fluido com características bem distinta da fluidização, o que faz com que ele possa realizar determinadas operações que não podem ser executadas em leitos fluidizados, como por exemplo, operar com partículas maiores que 1mm, quando o ar é usado como fluido (Mathur e Epstein, 1974). Sua aplicação tem sido estudada em processos físicos como secagem, granulação e recobrimento, justamente, por promover excelente grau de mistura dos sólidos e efetivo contato entre as fases sólido-fluido, o que resulta em elevadas taxas de transferência de calor e massa (Freitas e Freire, 2000).

Os sólidos realizam um movimento cíclico sistemático que estabelece um sistema fluidodinâmico único caracterizado por três regiões distintas: o jorro, o ânulo e a fonte (Marthur e Epstein, 1974; Freire, *et al.* 2011). Durante o movimento cíclico, os sólidos são submetidos pela vazão de fluido a um choque mecânico, denominado de atrição, devido o impacto uns com os outros e contra a parede do leito de jorro. Como efeito ocorre o desgaste (abrasão da superfície sólida) que promove a redução no tamanho dos sólidos, em relação à dimensão original. Esse efeito gera um resíduo fino que na grande maioria das vezes é inaceitável e, portanto, devendo ser removido do processo por ciclones ou outros equipamentos de separação sólido-fluido (Bemrose e Bridgwater, 1980).

A atrição de materiais particulados no leito de jorro depende de fatores como o desempenho do processo, as condições operacionais e as propriedades dos materiais. Desde o final da década de 60, esses fatores vêm sendo verificados experimentalmente pela Universidade de British Columbia com a utilização de partículas de fertilizantes (Mathur e Epstein, 1974). Ao longo dos anos mais pesquisas sobre esse assunto foram realizadas e estenderam-se para outros diferentes tipos de materiais, como calcita (Flamant, Chraibi, Vallbona e Bertrand, 1990); lignito (Wongvicha e Bhattacharya, 1994); e polímeros (Al-Senawi Hadi, Briens, & Chabagno, 2008). As pesquisas realizadas permitiram mostrar que parâmetros de desempenho como tamanhos de orifício de entrada do gás, ângulos do cone, profundidade do leito e velocidade do gás de entrada no leito influenciam significativamente no processo de abrasão dos materiais no interior do leito de jorro. No que se referem aos sólidos, as propriedades como o formato e a estrutura superficial são parâmetros importantes, uma vez que partículas irregulares podem ter seus cantos quebrados pelas colisões, tornando-se arredondadas e os sólidos de superfícies ásperas podem se desgastar e levar à abrasão superficial. Ambos os parâmetros apresentam em comum a redução do tamanho do material particulado com o tempo (Werther e Reppenhagen, 2003; Fernández-Akarregui, *et al.*, 2012).

Do ponto de vista numérico, os modelos propostos por Gwyn,(1969) e Lee *et al.*, (1993) são utilizados em sistemas de leitos fluidizados para determinar a cinética de atrição. Fernández-Akarregui, *et al.*, (2012) analisaram esses modelos no leito de jorro convencional e com tubo draft, nos quais os resultados simulados apresentaram boas concordâncias com os preditos pelo modelo. Além desse trabalho pouco se tem discutido quanto a utilização desses modelos em sistemas de leitos de jorro. O modelo de Gwyn,(1969), apresentado na Equação 1 permite determinar a taxa de atrição a partir das constantes, m valor igual a 0,46 e k_p com valores entre $4,47 \times 10^{-4} \sim 1,35 \times 10^{-5}$.

$$R_t = k_p m t^{m-1} W \quad (1)$$

Enquanto o modelo de Lee *et al.*, (1993), apresentado na Equação 2 tem a constante k_a que depende exponencialmente da energia de ativação, temperatura, velocidade superficial e de mínima fluidização, como mostra a Equação 3.

$$W_e = (W_0 - W_{\min}) e^{-k_a t} + W_{\min} \quad (2)$$

$$k_a = k_0 e^{-E_a R T C_s / P M u (u_0 - u_{mf})} \quad (3)$$

Tendo em vista a influência que os parâmetros fluidodinâmicos exercem na atrição dos materiais particulados e que ainda cabe discutir o assunto do ponto de vista experimental e numérico, principalmente, para materiais de distintas formas e estruturas superficiais, o presente trabalho tem como objetivo analisar a cinética de atrição, a partir de resultados experimentais e de simulação, em função de diferentes condições operacionais e propriedades físicas, utilizando esfera de vidro e alumina.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. Materiais

Foram utilizados nesse trabalho dois tipos de materiais particulados com distintas características físicas: esferas de vidro e de alumina. As esferas de vidro foram caracterizadas segundo o diâmetro médio da partícula e a massa específica real, enquanto que para as esferas de alumina a caracterização foi segundo ao diâmetro médio da partícula, massa específica aparente, massa específica real e porosidade. Para a análise granulométrica de ambos os materiais foi realizada o peneiramento dos materiais particulados em peneiras padronizadas Tyler para uma faixa de diâmetro de 1,70 a 4,69 mm. Os diâmetros médios das esferas foram obtidos através da definição de Sauter. Para a determinação da massa específica aparente foi utilizada a técnica de picnometria líquida, utilizando o solvente hexano como fluido percolante. A massa específica real foi determinada pela técnica de picnometria gasosa utilizando um picnômetro a gás hélio (Ultrapycnometer 1000, Quantachrome Instruments). Para a porosidade estimou-se a partir do conhecimento de espaços vazios do sólido em relação ao seu volume total em função de valores obtidos de massa específica real e aparente. Na Tabela 1 são apresentados os dados da caracterização referente às propriedades determinadas.

Tabela 1 – Propriedades físicas da esfera de vidro e alumina.

Propriedade	Esfera de vidro	Esfera de alumina
dp (mm)	3,2	3,0
ρ_{ap} (kg/m ³)	-	1501
ρ_{real} (kg/m ³)	2500	2482
ε_s (%)	-	40

Além dos materiais particulados, foram utilizados também neste trabalho uma unidade experimental, como mostrada na Figura 1 e detalhado em Freire, *et al.* 2011. Os transdutores de pressão e temperatura da entrada no leito de jorro, foram conectados a um sistema de aquisição de dados da marca LYNX composto por um módulo condicionador de sinais e uma placa de aquisição de dados, os quais são ao microcomputador. Para o monitoramento, aquisição e tratamento dos sinais de pressão e temperatura foi construída uma rotina em modo LabVIEW.

1.2. Métodos

O processo foi realizado em batelada e o procedimento dos ensaios para a análise da atrição iniciou-se com a secagem dos materiais particulados a 105°C por 24 horas, em uma estufa de circulação forçada. Após a secagem, o leito de jorro era carregado pelo topo com 1,800 kg de esferas de vidro ou com 1,760 kg de alumina. Depois de carregado, o soprador era ligado e a velocidade do ar de entrada fixada para as seguintes condições operacionais: valores iguais a 1,15 u/u_{mj} quando eram utilizadas as esferas de vidro e valores iguais a 1,05 ou 1,15 u/u_{mj} para as esferas de alumina. Para cada uma dessas condições operacionais, foi aguardado o regime estacionário sem que o sistema de aquecimento fosse ligado.

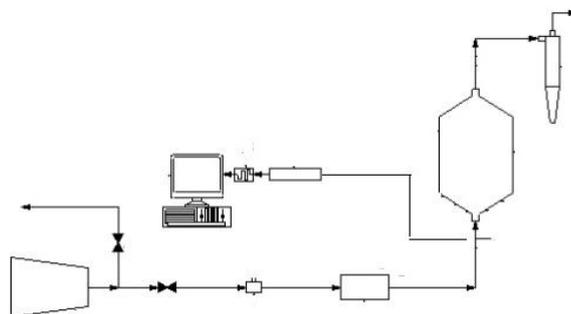


Figura 1 – Esboço do sistema leito de jorro.

Após ter atingido o estado estacionário, a velocidade do ar de entrada era reduzida até cessar completamente a movimentação do ar. Em seguida era aumentada gradativamente até atingir o valor máximo de operação. Atingido esse estágio, realizava-se então o processo inverso em que a velocidade do ar era novamente reduzida a zero. Esse procedimento ocorreu de forma gradativa obtendo-se simultaneamente os dados de queda de pressão e velocidade do ar, os quais foram utilizados na construção das curvas características do leito. Em seguida, a velocidade do ar foi novamente aumentada para a condição de operação e mantida por um determinado intervalo de tempo. Ao final desse tempo, a válvula da tubulação de descarga do ar em excesso era totalmente aberta e o soprador desligado. Por fim, os materiais foram retirados do leito de jorro por gravidade a partir de um orifício localizado na base cônicamente estreitada e o material fino gerado durante o processo foi coletado na saída do ciclone. Esse procedimento foi repetido até que o experimento atingisse 24 horas de operação.

Para os resultados simulados, os parâmetros do modelo foram estimados com base em rotinas computacionais desenvolvidas pelo software Matlab. Para isso, tomou-se como critério a minimização dos quadrados dos desvios entre dados observados e preditos pelos modelos empregados nesse trabalho, utilizando a função `lsqcurvefit`.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.1. RESULTADOS DE EXPERIMENTAIS

Neste tópico serão apresentados inicialmente os comportamentos fluidodinâmicos do leito de jorro a partir dos dados de queda de pressão em função da velocidade do ar crescente e decrescente, como mostram as curvas características nos gráficos da Figura 2 e 3. As curvas fluidodinâmicas apresentaram os comportamentos esperados e relatados pela literatura. O início da condição estável foi identificado visualmente, determinando-se a média dos valores de velocidade de mínimo jorro. Esses valores são iguais, aproximadamente a 24 m/s para as esferas de vidro e 27 m/s para as esferas de alumina. A partir disso, adotou-se realizar os experimentos, baseando em valores de velocidades iguais a $1,05 u_{mj}$ e $1,15 u_{mj}$.

Fixada as condições para a velocidade do ar de entrada, foi verificado se os materiais reduziram de tamanho, uma vez que o material particulado durante a atrição no leito de jorro tende a se desgastar ao longo do processo, bem como as propriedades físicas como tamanho e formato serem influenciados.

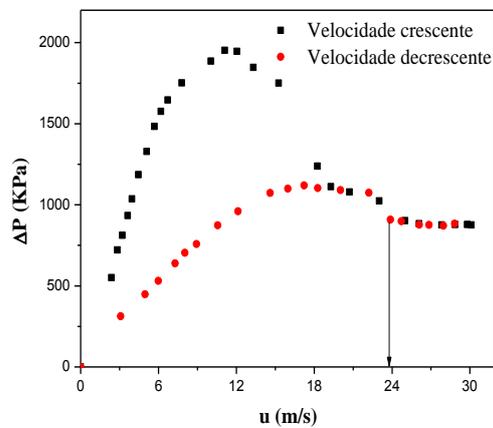


Figura 2 – curva característica do leito de jorro para as esferas de vidro.

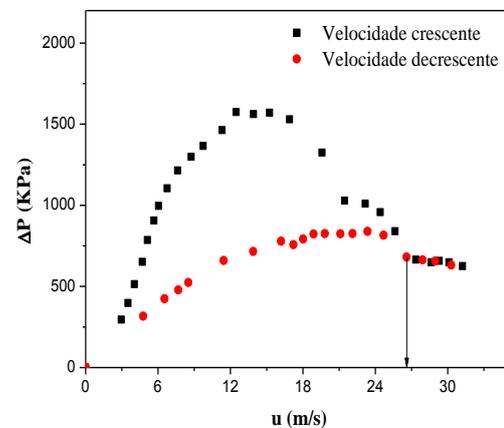


Figura 3 – curva característica do leito de jorro para as esferas de alumina.

A distribuição granulométrica de cada material permitiu identificar as variações no tamanho médio das amostras utilizadas para o período de operação de 24 horas, como mostram os gráficos das Figuras 4 e 5. No caso da Figura 4 observa-se que o tamanho médio da amostra de esfera de vidro permaneceu o mesmo. Embora tenha ocorrido o impacto interpartícula e a parede do leito, a atrição não foi o suficiente para proporcionar o desgaste dos mesmos. Além disso, durante o ensaio experimental, não foi verificado qualquer quantidade de resíduo referente ao material particulado. No entanto, para as esferas de alumina, observa-se que houve uma redução significativa no tamanho dos sólidos, como mostra a Figura 5. O diâmetro de Sauter dos sólidos antes e após o processo foi calculado, apresentando uma redução de aproximadamente de 2,0 % (3,0 – 2,97 mm).

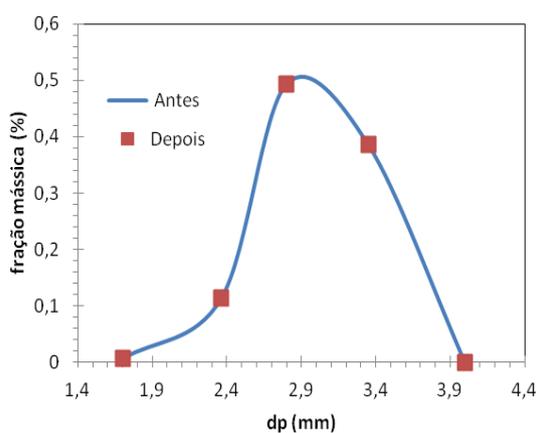


Figura 4 – distribuição granulométrica das esferas de vidro - 24 horas de operação.

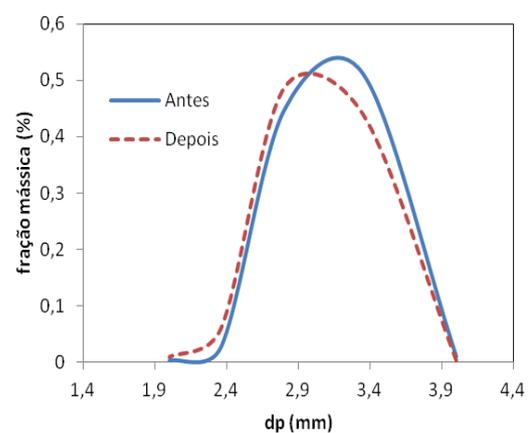


Figura 5 – distribuição granulométrica das esferas de alumina - 24 horas de operação.

O desgaste das esferas de alumina durante o processo pode ser identificado conhecendo a cinética de atrição, como mostra a Figura 6. Observa-se nessa figura que o peso dos sólidos diminui ao longo do tempo, tanto para 1,05 u/umj, quanto para 1,15 u/umj. Este comportamento

era esperado, pois durante o movimento cíclico realizado no interior do leito de jorro o material particulado se desgasta devido à atrição interpartícula e contra a parede do leito. Foi observado também que o efeito da velocidade do ar influenciou no comportamento da cinética de atrição. A maior diferença na redução do peso do material ocorreu em função da maior velocidade do ar de entrada. Isso pode ser explicado pela quantidade de movimento da mistura, uma vez que a intensidade do impacto dos sólidos entre si e contra a parede do leito depende da velocidade dos sólidos, os quais também são dependentes da quantidade de ar utilizada no sistema. Ainda na Figura 6, observa-se que a cinética de atrição apresenta comportamentos distintos para cada valor de velocidade do ar. Para a baixa velocidade do ar de entrada o comportamento é um decaimento exponencial do peso, com tendência a se manter constante a partir de um determinado tempo. Estudos sobre a atrição no leito de jorro têm mostrado que este é um comportamento típico do desgaste de materiais particulados, como foi observado por Fernández-Akarregui, et al., (2012); Lee et al. (1993). Embora, esses autores tenham utilizado diferentes configurações de equipamentos, condições operacionais e materiais de distintas características físicas. No entanto, não se pode afirmar que para a alumina esse comportamento será o mesmo para todas as condições, pois ao analisar o comportamento para a velocidade do ar mais alta, observou-se que o comportamento é uma redução linear do peso, estendendo-se até o final do processo.

Ambos comportamentos podem ser melhor compreendidos analisando o material fino gerado durante o processo e coletado na saída do ciclone para as duas velocidades do ar de entrada, como mostra o gráfico da Figura 7. Observa-se nesta figura que para 1,05 u/u_{mj} a produção de *finos* diminui, suavemente, desde o início até o final do processo. Enquanto que para 1,15 u/u_{mj} há uma brusca redução na produção de *finos* no instante inicial de operação, seguido de pequenas oscilações, as quais não influenciam significativamente, possibilitando afirmar que este comportamento se mantém constante até o final do processo.

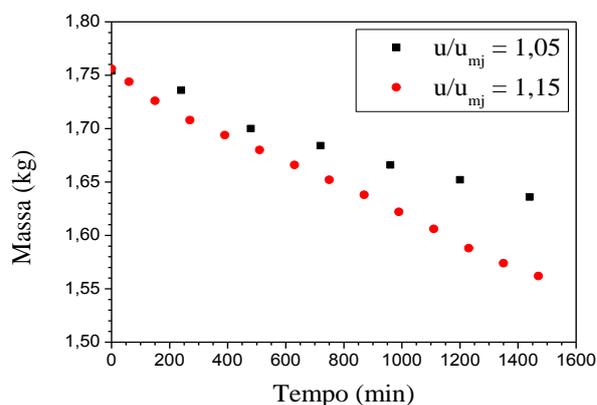


Figura 6 – Cinética de atrição para 1,05 e 1,15 u/u_{mj} .

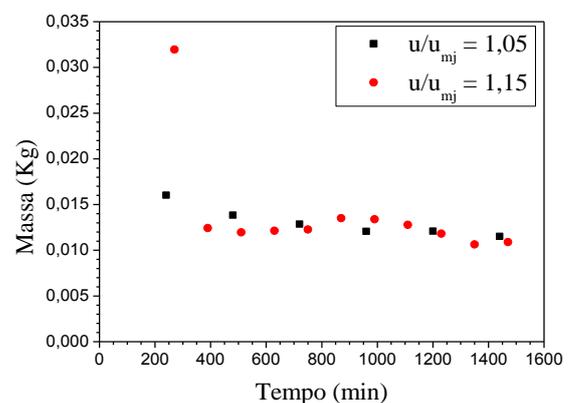


Figura 7 – Materiais finos para 1,05 e 1,15 u/u_{mj} .

2.2. RESULTADOS SIMULADOS

Os resultados experimentais da cinética de atrição foram analisados em função dos modelos de Gwyn, (1969) e de Lee *et al.* (1993), representados pelas Equações 1 e 3, respectivamente. Os resultados experimentais e das simulações são apresentados nos gráficos das Figuras 8 e 9.

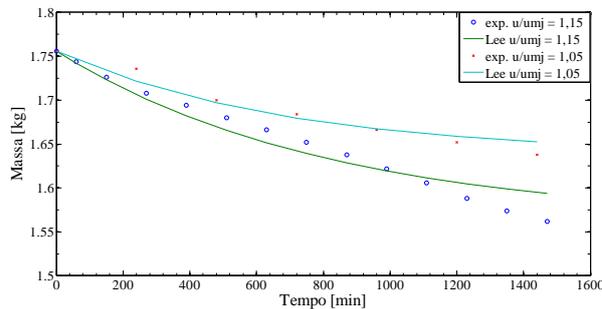


Figura 8 – Dados experimentais e simulado do modelo de Lee *et al.*, (1993) - 1,05 e 1,15 u/u_{mj} .

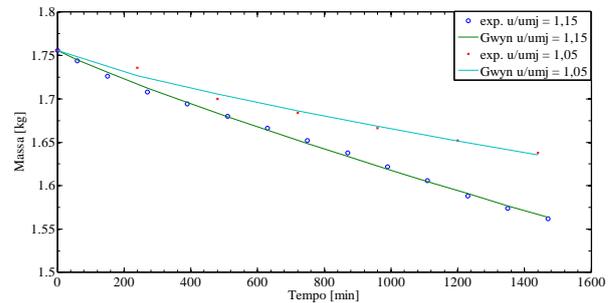


Figura 9 – Dados experimentais e simulado do modelo Gwyn, (1969) - 1,05 e 1,15 u/u_{mj} .

Nessas figuras observa-se que ambos os modelos são aceitos para prever a cinética de atrição no leito de jorro. No entanto, os resultados simulados pelo modelo de Lee *et al.*, (1993), representaram melhor o comportamento para a condição de 1,05 u/u_{mj} . Porém esta simulação foi realizada com base no trabalho realizado por Fernández-Akarregui, *et al.*, (2012), em que o parâmetro k_a foi modificado para assumir apenas a dependência da velocidade inicial e da de mínimo jorro, como mostra a Equação (4). Os valores dos parâmetros estimados foram $k_a = 0,0014$, $k_0 = 8.13 \times 10^{-4}$ e $k_1 = -12,1396$ para 1,05 u/u_{mj} .

$$k_a = k_0 e^{-k_1/u_0 (u_0 - u_{mj})} \quad (4)$$

O modelo de Gwyn, (1969) foi capaz de prever satisfatoriamente o comportamento da cinética de atrição para a maior velocidade do ar. Os resultados foram simulados a partir da integração da Equação 1, como mostra a Equação 5. Os valores dos parâmetros estimados foram $m = 0,8092$ e $k_p = 2,44 \times 10^{-4}$ para 1,15 u/u_{mj} .

$$W = -W_0 \exp(k_p m t^m) \quad (5)$$

3. CONCLUSÕES

Assim, pode-se concluir que foi possível analisar a cinética de atrição dos materiais particulados no leito de jorro tanto por ensaios experimentais quanto para os simulados numericamente nas condições operacionais utilizadas. Foi verificado que as esferas de vidro não se desgastaram durante o período de operação, uma vez que não ocorreu redução no tamanho do material e nem foi observado a presença de resíduo na saída do ciclone. As esferas de alumina reduziram cerca de 2% do seu tamanho original e, além disso, apresentaram um resíduo fino na saída do ciclone. A cinética de atrição para as esferas de alumina demonstraram, praticamente, um decaimento linear em função do tempo para $u/u_{mj} = 1,15$. O modelo de Gwyn, (1969) forneceu previsões aceitáveis em relação ao comportamento apresentado para $u/u_{mj} = 1,15$ com constantes de valores iguais a $m = 0,8092$ e $k_p = 2,44 \times 10^{-4}$. Enquanto o modelo de Lee *et al.*, (1993) apresentou melhores concordâncias para $u/u_{mj} = 1,05$ com constantes $k_a = 0,0014$, $k_0 = 8.13 \times 10^{-4}$ e $k_1 = -12,1396$. Este trabalho será continuado com mais experimentos e utilizando-se mais tipos de partículas e configurações de leito de jorro.

4. NOMENCLATURA

c_s	Concentração dos sólidos (Kg/m^3)	R_t	Taxa de atrição (Kg/s)
d_p	Diâmetro da partícula (mm)	T	Temperatura (K)
E_a	Energia de atrição (m^2/s^2)	T	Tempo (s)
K_a	Constante de atrição - Lee et al., (s^{-1})	u_0	Velocidade do ar de entrada (m/s)
K_p	Constante da equação de Gwyn (s^{-m})	u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
K_0	Constante cinética (s^{-1})	u_{mj}	Velocidade de mínimo jorro (m/s)
K_1	Constante cinética (s^{-1})	W_e	Massa dos sólidos no tempo t (kg)
m	Expoente para o tempo da atrição (-)	W_{min}	Peso mínimo dos sólidos (kg)
M_w	Peso molecular do ar (kg/mol)	ρ_{real}	Massa específica real (kg/m^3)
P	Pressão absoluta (Kg/m s^2)	ρ_a	Massa específica aparente (kg/m^3)
R	Constante dos gases (kJ/kmol K)	ϵ_s	Porosidade dos sólidos (-)

6. REFERÊNCIAS

- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. Spouted bed. New York. Academic Press, 1974. 304p.
- FREIRE, J.T.; FERREIRA, M.C., FREIRE, F.B.; Drying of Solutions, Slurries, and Pastes. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Spouted and Spout-Fluid Beds. Canadá: Editora Cambridge, 2011. p. 206-221.
- FREITAS, L.A.P.; FREIRE, J.T. Heat Transfer in a Draft Tube Spouted Bed with Bottom Solids Feed. Powder Technology, n. 114, p. 152-162, Maio. 2001.
- BEMROSE, C.R.; BRIDGWATER, J.; A Review of Attrition and Attrition Test Methods. Powder Technology, n. 49, p. 97-126, 1987.
- FLAMANT, G.; CHRAIBI, M.A. VALLBONA, G.; BERTRAND, C. Decarbonation and Attrition of Calcite in a Plasma Spouted Bed Reactor. Journal de Physique, n. 51, p. 527-534, 1990.
- WONGVICHA, P.; BHATTACHARYA, S.C. Attrition Lignite Char in a Spouted Bed Combustor. International Journal of Energy Research, n. 18, p. 9-20, 1994.
- AL-SENAWI, S.; HADI, B.; BRIENS, C.; CHABAGNO, J. M. A Comparison of the Breakage Mechanisms for Attrition of Selected Polymers in Pneumatic Transport and Spouted Bed. International Journal of Chemical Reactor Engineering, n. 6, 2008.
- WERTHER, J.; REPPENHAGEM, Attrition, In: YANG, W, C.; Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems, Ed Marcel Dekker, New York, p. 201-238, 2003.
- FERNÁNDEZ-AKARREGUI, A. R.; MAKIBAR, J. ALAVA, I.; DIAZ, L.; CUEVA, F.; AGUADO, R.; LOPEZ, G.; OLAZAR, M.; Sand Attrition in Conical Spouted Beds, Particuology, n. 10, p. 592-599, 2012.
- GWYN, J. E.; On the Particle Size Distribution Function and the Attrition of Cracking Catalysts. Aiche Journal, n. 15. P. 35-39, 1969.
- LEE, S. K.; JIANG, X. KEENER, T. C.; KHANG, S.J.; Attrition of Lime Sorbents During Fluidization in a Circulating Fluidized Bed Absorber. Industrial and Engineering Chemistry Research, p. 2758-2766, 1993.