

Rogério do Nascimento<sup>1</sup>  
Daniela Estelita Goes Trigueros<sup>2</sup>  
Aparecido Nivaldo Módenes<sup>3</sup>

## **DETERMINAÇÃO DO PONTO DE COLAPSO EM LEITOS FLUIDIZADOS CIRCULANTES**

**RESUMO:** Este trabalho tem por objetivo estabelecer uma metodologia para a obtenção das condições seguras de operação em leitos circulantes baseado na previsão do colapso da mistura gás-sólido, levantando a curva de velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de sólidos, juntamente com a estimativa da velocidade de partícula em função da velocidade mássica de sólidos. A metodologia é baseada no diagrama da velocidade de partícula sob várias velocidades do gás, ou condição de operação, com a curva da velocidade de “choking”, o que leva ao conhecimento da faixa operacional do leito circulante. Ou seja, será estabelecida por este método a faixa de vazão de gás e de sólidos que pode ser utilizada na operação do leito sem que haja colapso da mistura gás-sólido; ou mesmo o entupimento do riser. Um planejamento alternativo foi apresentado, o qual, leva em conta o colapso da mistura gás-sólido que pode existir na operação de CFB. Desta forma, é possível trabalhar com este equipamento em sua faixa segura de operação.

**PALAVRAS-CHAVE:** colapso; leito circulante; velocidade de choking.

**SUMMARY:** The objective of this work is to establish a methodology for takes the security conditions the operations for a fluidized bed catalytic reactor based on the collapse of the mixture gas-solid. The choking speed curve is represented like a function of the mass solid speed. The particle speed is

Data de recebimento: 02/11/05. Data de aceite para publicação: 12/03/07.

1 Engenheiro Químico. Professor Auxiliar. Núcleo de BioQuímica. Centro de Engenharias e Ciências Exatas. Unioeste – Campus de Toledo – Paraná – Brasil. Endereço eletrônico: rogenasc@unioeste.br.

2 Acadêmica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (Mestrado). Núcleo de BioQuímica. Centro de Engenharias e Ciências Exatas. Unioeste – Campus de Toledo – Paraná – Brasil.

3 Engenheiro Químico. Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Núcleo de BioQuímica. Centro de Engenharias e Ciências Exatas. Unioeste – Campus de Toledo – Paraná – Brasil.

estimated as a function of the mass solid speed. The methodology is based on the diagram of the particle speed versus gas speed for different conditions. This is in accordance with the choking speed curve, which will give as a result an operational range of fluidized bed catalytic reactor. In other words, the range of solid and gas outflow will be established by this method that can be used in the operation of the stream bed avoiding the collapse of the mixture gas-solid as well as the clogging of the riser. An alternative design method was presented, which, takes in account the collapse of the mixture gas-solid that can exist during the operation of fluidized bed catalytic reactor. Thus, using the proposed procedure, it is possible to work with this equipment in its safe range of operation.

KEYWORDS: collapse; fluidized bed; choking velocity.

## 1. INTRODUÇÃO

Os leitos fluidizados circulantes (CFB) nos quais as fases gasosa e particulada têm fluxos ascendentes (“riser”) são largamente utilizados nas indústrias química, metalúrgica e petroquímica (Wang et al., 1998; e Cheng et al., 1998).

O escoamento gás-sólido no “riser” apresenta comportamentos distintos nas direções axial e radial. A distribuição axial dos sólidos é descrita, geralmente, como aquela em que há uma região densa na base do equipamento e uma diluída no seu topo. No entanto, o escoamento radial é típico centro-anular, ou seja, uma região central diluída de sólidos, em que as partículas estão presentes de forma dispersa, com altas velocidades tanto do fluido quanto do sólido. Porém, a região central é envolta por outras mais densas, sendo que junto à parede do equipamento há escoamento lento de sólidos em fluxo descendente (WEI et al., 1995; Cheng et al., 1998; Wang et al., 1998). Segundo Wei et al. (1995), na região anular do escoamento, o mecanismo de mistura entre as fases é predominado por dispersões axial e radial, que ocorrem, basicamente, devido à agregação de particulados. Este tipo de comportamento compromete o desempenho do “riser”, devido ao aumento do tempo de residência médio dos sólidos. Fenômeno este, que não é interessante quando se intentam reações rápidas, evitando reações secundárias, características típicas de processos de craqueamento catalítico (FCC), pois, critérios de performance do reator tais como conversão e seletividade, são afetados pela agregação de partículas (CAO e WEINSTEIN, 2000).

O regime de fluidização rápida é um caso particular do escoamento em fase densa, típico dos leitos fluidizados circulantes,

que operam em condições de máxima velocidade relativa gás-sólido (FREIRE et al., 1993). Alguns autores, baseados em observações experimentais no reator “riser”, afirmam que o escoamento em fase densa no regime de fluidização rápida é caracterizado pela recirculação interna de sólidos, inexistente no escoamento em fase diluída, mas intenso quando a velocidade do gás é menor do que a sua velocidade na condição de colapso. Este fenômeno foi observado por Wei et al. (1995), Cheng et al. (1998) e Wang et al. (1998), quando estudaram o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado circulante, no qual as fases gasosa e particulada têm fluxos ascendentes. Ou seja, estes autores observaram o escoamento lento de sólido em fluxo descendente junto à parede do equipamento. Xu e Gao (2005) apresentaram um estudo da dependência da taxa de fluxo de sólidos com a velocidade de “choking” para diferentes velocidades de gás.

Segundo Freire et al. (1993), quando a velocidade superficial do gás é maior do que a sua velocidade na condição de colapso, a recirculação é menos pronunciada e ocorre principalmente na região anular do escoamento. No centro do escoamento há alta velocidade do gás e baixa concentração de sólidos, no entanto, na região anular existe menor velocidade do gás e maior concentração de sólidos. Nesta região anular do escoamento, o mecanismo de mistura entre as fases é dominado por dispersões axial e radial, que ocorrem, basicamente, devido à agregação de particulados (WEI et al., 1995, DENG et al., 2001).

Além das fases, mencionadas anteriormente, o transporte pneumático apresenta também um estado bem característico conhecido como “choking”. Para uma dada velocidade mássica de catalisador no “riser”, existe uma velocidade superficial mínima de vapor, na qual o “riser” não permanece em fase diluída de transporte (WILSON, 1997), abaixo desta velocidade, a mistura gás-sólido cai abruptamente em fase densa. O resultado é um súbito aumento na queda de pressão. Quando isto ocorre, o “riser” é levado ao colapso e a velocidade na qual isto ocorre é conhecida como velocidade de “choking”. Os métodos mais recentes encontrados na literatura (PETERSEN E ALDRICH, 1998; BAI et al. 1998 e XU et al. 2001) tratam-se de métodos empíricos, onde se necessita de um equipamento já montado para obtenção dos dados. O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para encontrar o ponto de interseção entre a velocidade estimada da partícula e a velocidade de “choking”, sem a necessidade da montagem prévia do leito circulante.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Operações de partida de unidades de FCC são particularmente susceptíveis ao “choking”. Durante a partida, vapor é usado geralmente para transportar o catalisador quente do regenerador até o reator. O fluxo do vapor é predeterminado por um dado “set point” e o fluxo de catalisador é regulado manualmente.

A quantidade de vapor que pode ser injetado para dentro do “riser” é limitada, muitas vezes, por considerações de projeto do sistema de injeção, e suas velocidades de circulação são, geralmente, muito mais baixas do que em velocidades de operação normal. Se for introduzido muito catalisador, os reatores “riser” podem entrar em colapso durante a circulação na partida.

O problema pode ser estimado, determinando a curva de velocidade de “choking” para o “riser”. A velocidade de “choking” e a velocidade mássica de catalisador podem ser estimadas por (WILSON, 1997):

$$\frac{V_{ch}}{\sqrt{gd_p}} = 9.07 \left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0.347} \left( \frac{Wd_p}{\mu} \right)^{0.214} \left( \frac{d_p}{D_T} \right)^{0.246} \quad (01)$$

Usando esta equação e conhecendo as propriedades do catalisador e do gás, uma curva da velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de catalisador pode ser construída. Caso a velocidade no “riser” seja acima da velocidade de “choking”, o “riser” permanece em fase diluída.

A queda de pressão no “riser” consiste principalmente em três componentes: a pressão perdida acelerando a alimentação e velocidade de catalisador, perda friccional e perda estática devido à densidade. Em adicional, se o “riser” inclui vários turnos, ocorre queda de pressão associada a estas variações na direção do fluxo.

A queda de pressão global no “riser”, exceto para os turnos (curvatura de entrada da mistura gás-sólido) ou saídas, é dada pela seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{\Delta V_g^2 \rho_g}{2g_c} + \frac{W \Delta V_p}{g_c} + \frac{2f \rho_g V_g^2 L}{g_c D_T} \left[ 1 + \left( \frac{f_p V_p}{f V_g} \right) \left( \frac{W}{V_g \rho_g} \right) \right] + \frac{WH}{V_p} + \rho_g H \quad (02)$$

Os dois primeiros termos da equação (02) refletem na perda de aceleração do gás e do sólido, respectivamente. O terceiro termo é a

perda friccional e os últimos dois termos são a estática do sólido e do gás.

Para o cálculo da queda de pressão, dois outros termos devem ser estimados: a velocidade da partícula ( $V_p$ ) e o fator de atrito da partícula ( $f_p$ ). Baseados em dados experimentais em transporte sob várias condições de operação, Knowlton, em Wilson (1997) desenvolveu as seguintes correlações:

$$V_p = \sqrt[3]{(V_g - V_{ch}) V_g^2} \quad (03)$$

$$f_p = \left[ 0.02515 \left( \frac{W}{\rho_g V_g} \right)^{0.0415} \left( \frac{V_p}{V_g} \right)^{-0.859} \right]^{-0.03} \quad (04)$$

Aplicando estas correlações em reatores “riser”, a taxa de fluxo volumétrico da fase vapor e a velocidade aumentam ao longo do comprimento. Quedas de pressão adicionais ocorrem nos turnos e na saída do “riser”. Cada uma destas, podem ser estimadas pela expressão (WILSON, 1997):

$$\Delta P = k \left( \frac{V_g^2 \rho_g}{2g_c} + \frac{WV_p}{g_c} \right) \quad (05)$$

Para turno com 45° tem-se  $k = 0.2$ ; para turno com 90°,  $k = 1.3$  e para a saída  $k = 1.0$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sendo o objetivo deste trabalho o de estabelecer um planejamento experimental de um leito circulante, baseado na previsão do colapso da mistura gás-sólido, utilizando a metodologia descrita, juntamente com o programa computacional desenvolvido, em um leito fluidizado circulante, como o apresentado na Figura 01, o primeiro passo é a construção de uma curva da velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de sólidos, como apresentado na Figura 02.

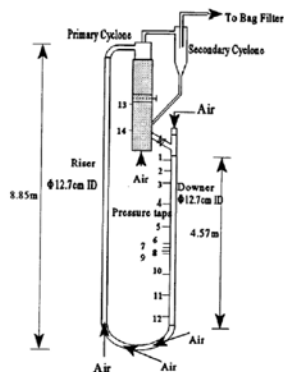


Figura 01 Leito fluidizado circulante (XU e GAO, 2005).

Analisando a Figura 02, verifica-se que a velocidade de “choking” aumenta rapidamente, e exponencialmente, com o aumento da velocidade mássica de sólidos.

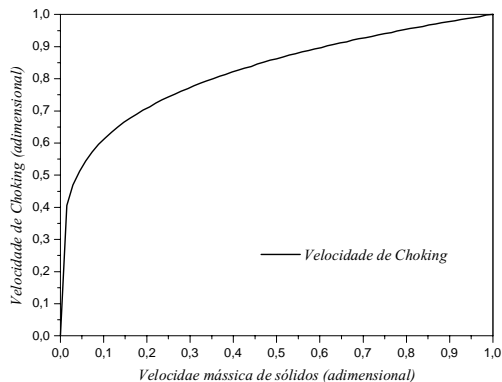


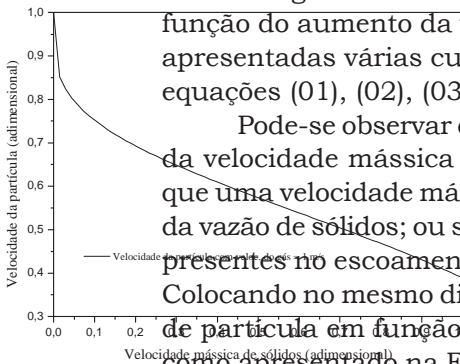
Figura 02 Curva da velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de sólidos no riser.

Ressalte-se que neste trabalho o diagrama só é possível se ambas velocidades, de “choking” e de partícula, estiverem adimensionalizadas.

A Figura 03 apresenta o comportamento da velocidade da partícula em função da velocidade mássica de sólidos obtido através da solução das equações (01) e (03). Nesta figura, fica claro que a velocidade de partícula tende a diminuir com o aumento da velocidade mássica de sólidos. O que é uma tendência já esperada, visto que com o aumento da velocidade mássica de sólidos, a uma vazão de gás fixa, portanto, de

velocidade de gás fixa, existirá maior concentração de sólidos a serem arrastados pelo gás.

Figura 03 Curva da velocidade de partícula em função da velocidade mássica de sólidos, com velocidade de gás de 1 m/s.



A Figura 04 mostra o comportamento da queda de pressão em função do aumento da velocidade mássica de sólidos. Nesta figura são apresentadas várias curvas, cada uma delas geradas pela solução das equações (01), (02), (03) e (04) para diferentes velocidades de gás.

Pode-se observar que a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade mássica de sólidos. Comportamento coerente, uma vez que uma velocidade mássica de sólidos maior é atingida com o aumento da vazão de sólidos; ou seja, existirá uma maior quantidade de partículas presentes no escoamento, o que leva ao aumento da queda de pressão.

Colocando no mesmo diagrama a velocidade de “choking” e a velocidade de partícula em função do aumento da velocidade mássica de sólidos, como apresentado na Figura 05, existirá um ponto de interseção entre as curvas, definido como sendo o ponto de colapso. Ou seja, o ponto onde a vazão de gás não é mais suficiente para arrastar a fase particulada. A importância da estimativa deste ponto está associada à determinação das variáveis de operação do leito circulante, pois, a estimativa deste ponto leva ao conhecimento prévio, embora de caráter aproximado, da quantidade de catalisador possível de ser arrastada para determinada condição de operação.

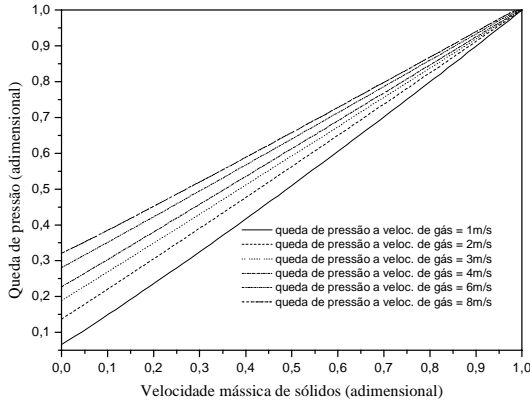


Figura 04 Queda de pressão em função da velocidade mássica de sólidos, para diferentes velocidades de gás.

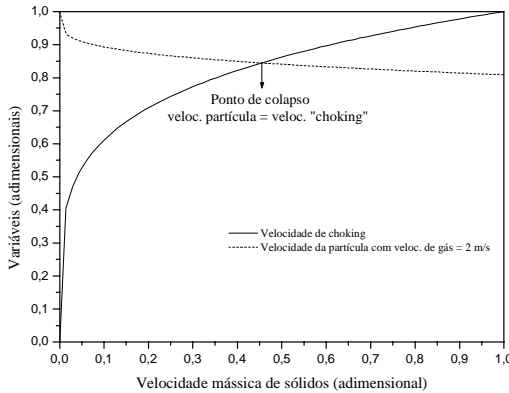


Figura 05 Curvas da velocidade de partícula e velocidade de “choking” em função da velocidade mássica de sólidos.

A Figura 06 exemplifica a metodologia, onde são demonstradas as velocidades de partículas para as várias velocidades de gás, juntamente com a curva de velocidade de “choking”. Analisando esta figura, verifica-se que a faixa segura de operação é sempre aquela onde a velocidade do particulado é maior do que a de “choking”; isto para cada velocidade de gás em que se deseja trabalhar. Por isto, este método é somente uma maneira alternativa de se fazer um planejamento experimental contornando, de maneira estimada, a ocorrência do colapso da mistura gás-sólido. Uma vez que os métodos estatísticos, tais como planejamento fatorial, apenas tomam uma faixa



dada de vazão de gás e uma faixa de vazão de sólidos, fazendo uma combinação destas para encontrar a influência destes parâmetros em uma dada variável; no caso de estudo poderia ser a pressão total da Unidade.

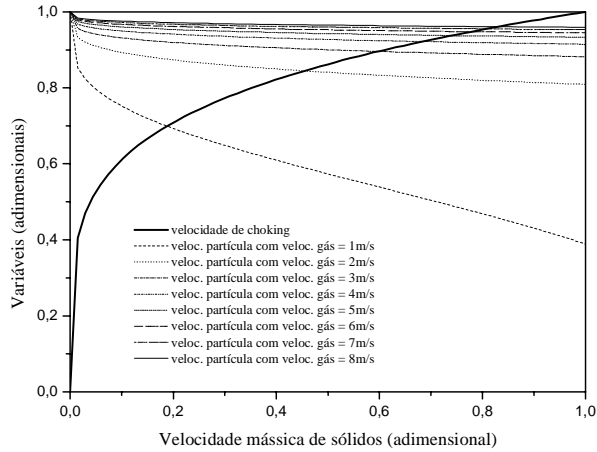


Figura 06 Curvas de velocidades de partículas, para várias velocidades de gás, juntamente com a curva de velocidade de “choking”.

Logo, os métodos estatísticos não são aplicáveis, diretamente, em leitos circulantes. É necessário primeiro determinar a faixa segura de alimentação de sólidos para a faixa de vazão de gás a ser utilizada. Conhecendo-se a faixa segura, então se pode empregar qualquer ferramenta de planejamento experimental para obter as condições de operação de leitos circulantes.

Através da análise da Figura 06, foram determinadas as faixas seguras, nas quais não irá acontecer o colapso da mistura gás-sólido, que o leito pode ser operado. A Tabela 01 mostra os resultados desta análise. Nesta tabela, têm-se os dados referentes à que capacidade de vazão de sólidos a Unidade pode operar sob uma dada velocidade de gás. Ou seja, para se trabalhar com 60% da capacidade de alimentação de sólidos na Unidade é necessário utilizar uma vazão de gás de no mínimo 4 m/s; por exemplo.

TABELA 01 - Faixas operacionais do leito circulante

Percentual de vazão de sólidos (%)	Velocidade de gás (m/s)	Vazão de sólidos (kg/s)
0-15	1	0,011
0-35	2	0,024
0-50	3	0,034
0-60	4	0,041
0-65	5	0,044
0-72	6	0,049
0-76	7	0,051
0-82	8	0,056

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como meta gerar uma metodologia para encontrar o ponto de colapso de um leito fluidizado circulante sem a necessidade de se realizar um planejamento experimental, visto que este não é aplicável neste tipo de equipamento por suas condições de operação. Assim, foi desenvolvida uma metodologia a partir da qual levou-se em conta o colapso da mistura gás-sólido que pode existir na operação do leito fluidizado circulante. A metodologia foi baseada na interseção da velocidade de “choking” e velocidade mássica de sólidos como o ponto crítico no “riser”; ou seja, no ponto onde ocorre o colapso da mistura. A faixa segura de operação do leito fluidizado circulante, na qual não ocorrerá o colapso da mistura gás-sólido, é sempre aquela condição de operação acima do ponto de interseção velocidade de “choking” e velocidade mássica de sólidos. Assim, com a utilização da metodologia proposta é possível a obtenção de uma faixa segura de operação, onde não ocorrerá o colapso da mistura gás sólido.

## 5. NOMENCLATURA

$V_{ch}$	velocidade de "choking", m/s
$g$	constante gravitacional, 9,81 m/s <sup>2</sup>
	tamanho da partícula, m
$\rho_p$	densidade da partícula, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	densidade do gás, kg/m <sup>3</sup>
$W$	velocidade mássica de sólidos, kg/m <sup>2</sup> s
$\mu$	viscosidade do gás, kg/ms
	diâmetro do "riser", m.
$\Delta P_T$	queda de pressão do leito diluído (atm)
	queda de pressão devido ao fluido (atm)
$\Phi$	Esfericidade
	pressão, kg/m <sup>2</sup>
	velocidade mássica de sólidos, kg/m <sup>2</sup> s
$g_c$	constante gravitacional, 9,81 m/s <sup>2</sup>
$V_g$	velocidade do gás, m/s
$V_p$	velocidade da partícula, m/s
$f$	fator de atrito de Fanning, adimensional
$f_p$	fator de atrito da partícula, adimensional
$L$	Comprimento do "riser", m
	diâmetro do "riser", m
$\rho_g$	densidade do gás, kg/m <sup>3</sup>
$H$	altura vertical do "riser", m.
	densidade da partícula, kg/m <sup>3</sup>
$D_{pi}$	diâmetro da partícula, m
$\mu$	viscosidade do gás, kg/ms
	temperatura do gás, OF

## 6. REFERÊNCIAS

- BAI, D.; ISSANGYA, A. S.; GRACE J. R. A novel method for determination of choking velocities. **Powder Technology**, vol. 97, p. 59-62, 1998.
- CAO, C.; WEINSTEIN, H. Characterization of downflowing high velocity fluidized beds. **AIChE Journal**, vol. 46, p. 515 - 522, 2000.
- CHENG, Y.; WEI, F. G.; JIN, Y. Inlet and outlet effects on flow patterns in gas-solid risers. **Powder Technology**, vol. 98, p. 59 - 62, 1998.
- DENG, R.; WEI, F.; LIU, T.; JIN, Y. Radial behavior in riser and downer during the FCC process. **Chemical Engineering and Processing**, 2001.
- FREIRE, J. T.; DA SILVEIRA, A. M.; FERREIRA, M. C. **Transporte pneumático vertical**. 1993. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos – São Carlos.
- PETERSEN, K.R.P.; ALDRICH, C., Prediction of choking in hydrocyclones by use of elementary particle interaction theory. **Int. J. Miner Process**, p. 201-211, 1998.
- WANG, J.; BOUMA, J. H.; DRIES, H. An experimental study of cyclone flow in fluidized catalytic cracking. **Powder Technology**, vol. 112, p. 221 - 228, 1998.
- WEI, F.; JIN, Y.; YU, Z.; W. CHEIN. Lateral and axial mixing of the disperse particle in CFB. **J. Chem. Engineering of Japan**, vol. 28, n.5, p. 506 - 510, 1995.
- WILSON, Joseph W. **Fluid Catalytic Cracking: Technology and Operation**. Tulsa, Oklahoma: Pennwell Publishing Company, 1997.
- XU, G.; NOMURA, K.; GAO, S.; KATO, K. More Fundamentals of dilute Suspension Collapse and Choking for Vertical Conveying Systems. **AIChE Journal**. vol. 47, n.10, p. 2177 - 2196, 2001.
- XU, G; GAO, S. Dependence of the solid flow rate on gas velocity at choking of different types. **Powder Technology**, vol. 150, p.185 - 188, 2005.