



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA DIFERENÇA DE PRESSÃO ENTRE AS EXTREMIDADES DE UMA VÁLVULA CÔNICA NO CONTROLE DA DESCARGA DE SÓLIDOS PARTICULADOS

Júlio César Dainezi de Oliveira
Universidade Estadual de Campinas – dainezi@fem.unicamp.br

Arai Augusta Bernárdez Pécora
Universidade Estadual de Campinas – arai@fem.unicamp.br

Resumo. Neste trabalho foi utilizada uma válvula mecânica, tipo cônica, para controlar a descarga de areia aquecida entre uma câmara de combustão e um trocador de calor, ambos operando em regime fluidizado. Os experimentos foram conduzidos segundo um planejamento fatorial em dois níveis e avaliados estatisticamente através do teste “t”. Os resultados obtidos para a descarga do particulado através da válvula foram analisados utilizando-se a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). As variáveis estudadas foram a diferença de pressão entre as extremidades da válvula cônica, o diâmetro médio da partícula e a temperatura na câmara de combustão. Dois diferentes níveis de pressão e temperatura dentro da câmara de combustão foram usados: 300 e 1123 K e 1,37 e 2,75 kPa. Resultados mostraram que as três variáveis estudadas foram estatisticamente significativas e que a máxima descarga de sólidos foi obtida com a configuração experimental operando em condições de menor temperatura. A descarga aumentou com o aumento da diferença de pressão entre as extremidades da válvula.

Palavras-chave: Válvula de alimentação, Planejamento fatorial de experimentos, Metodologia de superfície de resposta.

1. INTRODUÇÃO

A transferência de sólidos particulados entre reatores operando em regime de leito fluidizado pode ser executada através de equipamentos diversos com diferentes princípios de funcionamento. Esses equipamentos podem ser classificados em dois grupos: válvulas mecânicas e válvulas não mecânicas. A seleção de uma válvula pertencente a um ou outro grupo está relacionada ao regime de fluidização em que a transferência do material particulado ocorre.

O princípio de operação das válvulas não mecânicas é o mesmo para os modelos existentes, dentre os quais as do tipo L e V são as mais aplicadas. A geometria e a quantidade de ar injetado na válvula não mecânica são os fatores de influência sobre o controle da descarga de sólidos.

O controle da descarga através das válvulas mecânicas é obtido através do deslocamento rotativo ou longitudinal de partes móveis em seu interior, que determinam a capacidade e característica de controle dessas válvulas.

A válvula utilizada neste trabalho é mecânica, tipo cônica, com controle da descarga através do movimento longitudinal do cone de fechamento em relação ao orifício sede. As características típicas desse tipo de válvula são a possibilidade de seleção de descargas através do ajuste do mecanismo de abertura e descarga constante para uma abertura fixa. Essas características representam confiabilidade na operação da válvula e na repetibilidade das descargas, assegurando que as especificações de projeto sejam atendidas na operação dos reatores fluidizados.

Merrow (1985) relatou que 52% das paradas em plantas de processo foram consequência de problemas mecânicos advindos do procedimento de transferência de material particulado. Dessa forma a válvula estudada foi projetada para atender a necessidade de transferir sólidos particulados, em temperaturas elevadas, entre reatores dentro de uma ampla faixa de descarga e com confiança no controle e estabilidade de operação.

2. METODOLOGIA E MATERIAIS

Os experimentos realizados foram conduzidos segundo um planejamento fatorial em dois níveis (Box *et al.*, 1978), objetivando estudar e avaliar o efeito das variáveis de influência (fatores) sobre a descarga de sólidos através da válvula cônica (resposta). A aplicação de técnicas estatísticas resulta em diversos benefícios como a redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação (Montgomery, 1997). Os resultados obtidos experimentalmente, a partir do planejamento fatorial, foram estatisticamente avaliados aplicando-se o teste “t” de *Student* e graficamente representados através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

Para avaliar a relação entre a resposta e os fatores, foi proposto um modelo de primeira ordem, descrito segundo a Eq. (1):

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

para $i=1, \dots, k$

Nesta equação y é a variável de resposta, β_0 é a média da resposta para os experimentos, β_i são os coeficientes dos termos lineares do polinômio, x_i são as variáveis independentes codificadas, ε é o erro aleatório e k são os fatores. O uso das variáveis codificadas (x_i) para ajustar o modelo matemático traz, segundo Khuri e Cornell (1996), três vantagens principais sobre o uso direto dos fatores: facilidade computacional; aumento da exatidão na estimativa dos coeficientes do modelo; e facilidade de interpretação desses coeficientes. Uma equação conveniente para definir a variável codificada é:

$$x_i = \frac{2X_i - (X_{i-1} + X_{i+1})}{X_{i-1} - X_{i+1}} \quad (2)$$

onde X_{i-1} e X_{i+1} são, respectivamente, os níveis inferior e superior de cada um dos fatores.

Para que a Eq. (1) represente a resposta desejada, segundo Havlicek e Crain (1988), deve-se assumir as seguintes hipóteses simplificadoras para o erro aleatório: são normalmente distribuídos e com somatório de erros esperados iguais a zero para cada combinação de fatores; para cada combinação de fatores obtém-se a mesma variância ε ; são independentes em cada fator e na combinação de todos os fatores. Assim a Eq. (1) torna-se:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum \beta_i x_i \quad (3)$$

Os fatores estudados foram: queda de pressão entre as extremidades da válvula (ΔP_v); diâmetro médio do sólido particulado (dp) e temperatura do leito fluidizado (T_L), cujos valores são apresentados na Tab.(1).

Tabela 1. Fatores de influência e seus níveis

Variável	Nível Inferior	Nível superior
ΔP_v [kPa]	1,37	2,75
dp [$\times 10^{-4}$ m]	185	285
T_L [K]	300	1123

O material particulado empregado foi areia com massa específica de 2710 kg/m^3 . A escolha de um material inerte objetivou estudar somente o escoamento das partículas através da válvula cônica, não interessando quaisquer reações químicas em seu interior ou na câmara de combustão. Os níveis dos fatores foram fixados em função das características construtivas da câmara de combustão e limitações do conjunto experimental. As diferenças de pressão entre as extremidades da válvula cônica estão relacionadas com as alturas do leito fluidizado dentro da câmara de combustão. Os diâmetros de partícula utilizados estão dentro da faixa usualmente encontrada no descarte de cinzas provenientes de reatores com leito fluidizado operando com combustíveis sólidos (Munts *et al.*, 1990).

3. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO E APARATO EXPERIMENTAL

A configuração básica utilizada neste estudo é representada na Fig. (1). O sistema experimental é composto principalmente da câmara de combustão (à esquerda), do trocador de calor (à direita) e da válvula cônica, montada entre esses equipamentos. Nessa figura não são mostrados os equipamentos auxiliares, tais como sopradores, silo de armazenagem, rotômetros e válvulas.



Figura 1. Visão do sistema experimental

A válvula cônica foi montada na lateral da câmara de combustão, posicionada em um ângulo de inclinação de 37° em relação à vertical, o qual é maior que o ângulo de repouso da areia, segundo Sarkar *et al.* (1991). A areia foi alimentada pela lateral da câmara de combustão a uma altura de 0,370 m da placa distribuidora, de forma contínua, mantendo constante o nível de sólidos durante os testes em 0,370 ou 0,570 m. A entrada da válvula cônica estava 170 mm da placa distribuidora. O princípio de construção da câmara de combustão permitiu o aquecimento do material particulado simultaneamente com sua fluidização, em regime de leito fluidizado borbulhante. Para os testes a quente a combustão foi realizada através da queima de gás liquefeito de petróleo (glp) em atmosfera oxidante com 10% de excesso de ar.

O procedimento foi basicamente o mesmo para a realização dos testes a frio e a quente, compreendendo as etapas de preparação do material particulado, acionamento dos sopradores, inicialização do sistema de aquisição de dados, aberturas de válvulas auxiliares e alimentação da câmara de combustão com a areia, monitorando seu nível dentro da câmara através da pressão do leito. Para os testes a quente diferenciava-se a etapa de alimentação da câmara de combustão, que

ocorria gradualmente para permitir o aquecimento da areia. A estabilidade da combustão era atingida em torno de 923 K.

A Figura (2) mostra o esquema de montagem da válvula cônica além de detalhes construtivos da câmara de combustão e da alimentação da areia.

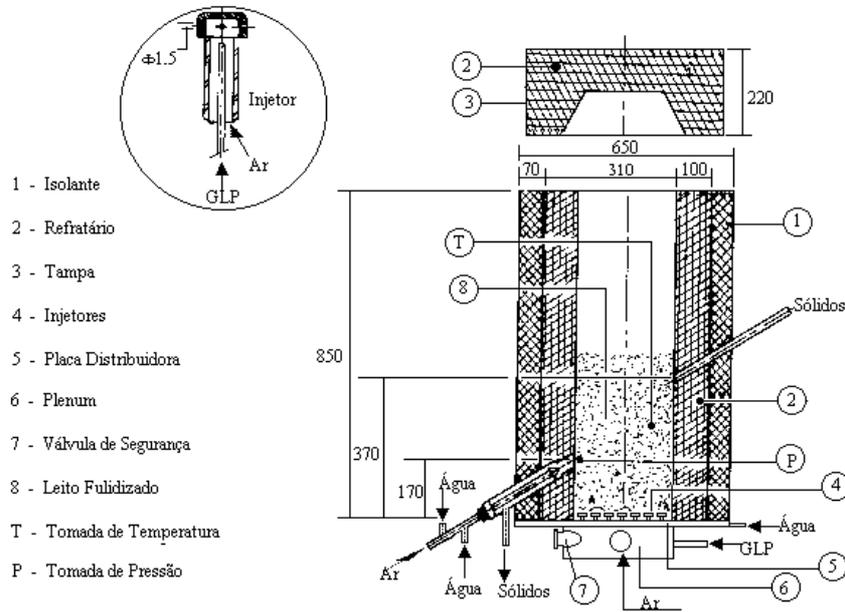
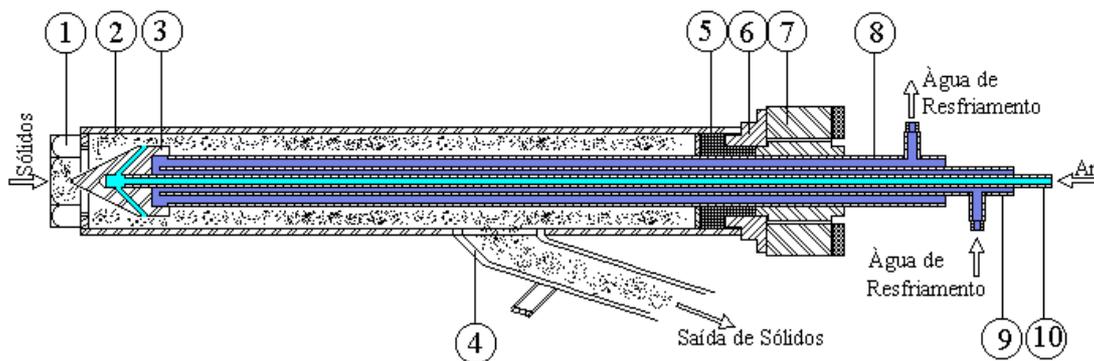


Figura 2. Esquema de montagem da válvula e da câmara de combustão

A válvula cônica, mostrada em corte na Fig. (3), foi fabricada em aço inox ASTM A 276 T 310 em razão da temperatura de operação que atingiu 1123 K. O controle da descarga foi através do movimento longitudinal do cone de fechamento (item 3) em relação ao orifício sede (item 1). Os tubos de água de resfriamento e injeção de ar foram introduzidos para assegurar o regular funcionamento da válvula; evitando dilatações de seus componentes internos e para manter a suspensão gás-partícula ao longo do tubo de saída, respectivamente.



- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| 1 Tubo de Entrada | 6 Prensa-Gaxetas |
| 2 Corpo da Válvula | 7 Cursor |
| 3 Cone de Fechamento | 8 Haste |
| 4 Tubo de Saída de Sólidos | 9 Tubo para Água de Resfriamento |
| 5 Gaxetas | 10 Tubo de Injeção de Ar |

Figura 3. Esquema da válvula cônica

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados, obtidos a partir do planejamento fatorial proposto, foram determinados através da realização dos experimentos em duplicata, possibilitando a estimativa do desvio dos efeitos. A partir desse desvio foi possível avaliar a significância estatística dos efeitos, utilizando-se do teste “t” de *Student*, para um nível de confiança nos resultados de 95%. O desvio padrão dos efeitos (S_{ef}), calculado segundo Barros Neto *et al.* (1995), foi determinado através da análise das variâncias, primeiro de cada um dos experimentos e posteriormente de uma estimativa conjunta da variância experimental a partir de todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores.

A Tabela (1) apresenta os resultados obtidos das duas medidas realizadas e os respectivos valores médios.

Tabela 1. Convalidação dos resultados

Experimentos	Fatores Principais			Resposta – Ms [kg/h]		
	ΔP_v [kPa] X ₁	dp [$\times 10^{-4}$ m] X ₂	T _L [K] X ₃	1º Medição	2º Medição	Média
1	1,37	185	300	396,0	403,2	399,6
2	2,75	185	300	658,8	633,6	646,2
3	1,37	185	300	352,8	331,2	342,0
4	2,75	185	300	633,6	640,8	637,2
5	1,37	285	1123	338,4	403,2	370,8
6	2,75	285	1123	518,4	453,6	486,0
7	1,37	285	1123	288,0	309,6	298,8
8	2,75	285	1123	460,8	489,6	475,2

Os resultados finais da análise estatística, avaliação significativa de cada um dos efeitos principais e de suas interações, são mostrados na Tab. (2). O efeito é considerado estatisticamente significativo se seu valor, em módulo, for maior que ($S_{ef} \times t$), ou seja, 30,09, sendo SE (Significativo Estatisticamente) e NSE (Não Significativo Estatisticamente).

Tabela 2. Resultados da análise estatística dos efeitos.

Fatores e Interações	Estimativa do Efeito M _s (kg/h)	Resultado Estatístico
X1 (ΔP_v)	208,35	SE
X2 (dp)	-37,35	SE
X3 (T _L)	-98,55	SE
X1X2	27,45	NSE
X1X3	-62,55	SE
X2X3	-4,05	NSE
X1X2X3	3,15	NSE

Os sinais negativos existentes na Tab. (2) significam que ao mudar do nível inferior para o nível superior de um fator principal haverá uma perda na resposta de interesse, ou seja, diminui a descarga de sólidos através da válvula. Os efeitos positivos têm interpretação contrária. O fato do efeito da interação X1X3 ser significativo indica que os efeitos principais devem ser interpretados conjuntamente. As interações e os efeitos principais podem ser representados graficamente, como na Fig. (4), pares a-b, c-d e e-f. A interação X1X3 diminui a descarga de sólidos quando há variação de seus níveis, como determinado pela análise estatística e representado através da Fig. (4 a-b),

onde a influência da interação é verificada pela diagonal que liga os níveis superiores dos dois fatores principais, ΔP_v e T_L .

Para a interpretação dos fatores principais basta proceder a uma alteração do nível inferior para o superior do fator desejado e verificar os valores da resposta, i.e., na Fig. (4 c-d) ao passar do nível inferior de d_p , 185×10^{-4} m, para o nível superior, 285×10^{-4} m, em ambos os níveis de ΔP_v a descarga de sólidos diminui. Aplicar este procedimento, para os eixos das abcissas e das ordenadas, às demais figuras encontrar-se-á resultados compatíveis com a análise estatística realizada através do estudo das variâncias e do teste de hipóteses.

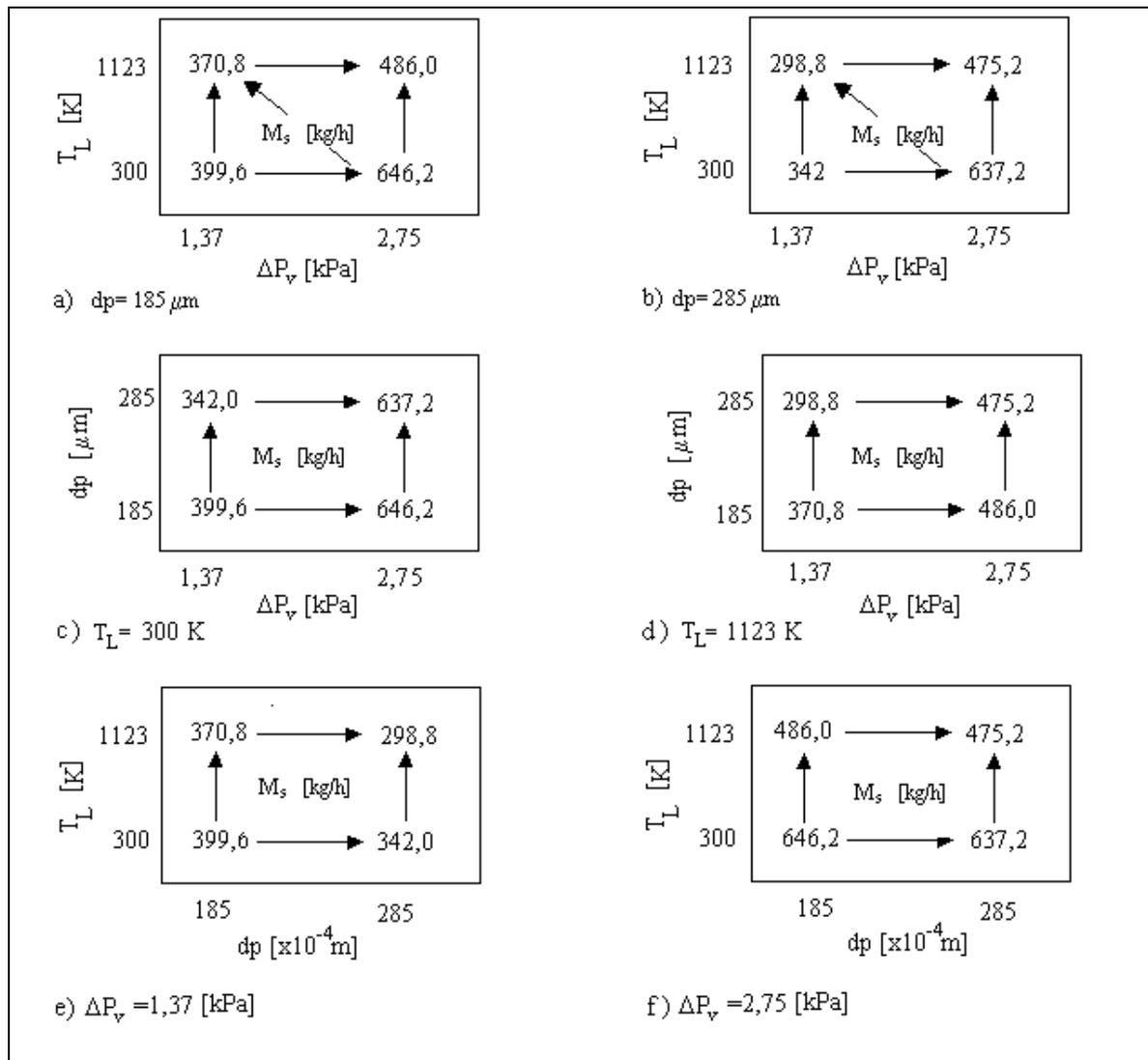


Figura 4. Diagrama para interpretação dos efeitos principais e interações sobre M_s

Os resultados estatísticos dos fatores principais têm significado físicos que serão discutidos em detalhes. A influência negativa da temperatura dentro da câmara de combustão sobre a descarga de sólidos é creditada ao aumento da porosidade do leito fluidizado, ocasionando menor concentração de partículas sólidas no tubo de entrada da válvula, Fig. (3) item 1, e conseqüente queda na descarga de sólidos em relação à configuração experimental dos testes a frio. O aumento da porosidade em função da elevação da temperatura é, segundo Kunii e Levenspiel (1991), da ordem de 8% para temperaturas acima de 773 K.

A significância estatística do diâmetro médio da areia era esperada no início do trabalho, pois, o tamanho da partícula afeta os processos onde são utilizadas (Mohsenin, 1970). A diminuição da descarga com o aumento do diâmetro da partícula é devido a uma diminuição do coeficiente de

descarga para partículas menores que 330×10^{-4} m, segundo estudo de Geldart e Haesebrouck (1983).

A queda de pressão entre as extremidades da válvula cônica, que está relacionada à altura de sólidos dentro da câmara de combustão, é considerada como força motriz para o escoamento da suspensão gás-partícula, promovendo o aumento da descarga de sólidos através da válvula quando há mudança para o nível superior desse fator.

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é constituída de duas etapas: a modelagem e o deslocamento. A modelagem proposta neste trabalho será o ajuste de um modelo linear a partir dos resultados, propiciando estimar valores de resposta em pontos diversos sobre a região experimental, além de servir como base para a construção das superfícies de resposta. A Eq. (4) é resultante desse ajuste.

$$\hat{y} = 318,956 + 150,978X_1 - 0,3735X_2 - 0,119745X_3 \quad (4)$$

A Tabela (3) apresenta, além dos resultados experimentais, os resultados calculados através do modelo ajustado e o erro residual. O erro residual representa a diferença entre os valores medidos e os estimados através do modelo. Os erros individuais são úteis para verificar quão próximos os valores estimados encontram-se dos valores medidos.

Tabela 3. Resultados do modelo matemático e do erro residual

Experimentos	Medições	\hat{y}	e
1	399,6	420,77	-21,17
2	646,2	629,12	17,08
3	342,0	383,42	-41,42
4	637,2	591,77	45,43
5	370,8	322,22	48,58
6	486,0	530,77	-44,57
7	298,8	284,87	13,93
8	475,2	493,22	-18,02

As Figuras (5), (6) e (7) são as superfícies de resposta construídas utilizando-se o *software* STATISTICA. As superfícies de resposta estão representadas tridimensionalmente, permitindo analisar os efeitos dos fatores, dois a dois, sobre a resposta. A análise simultânea das superfícies de resposta leva à região de maior descarga.

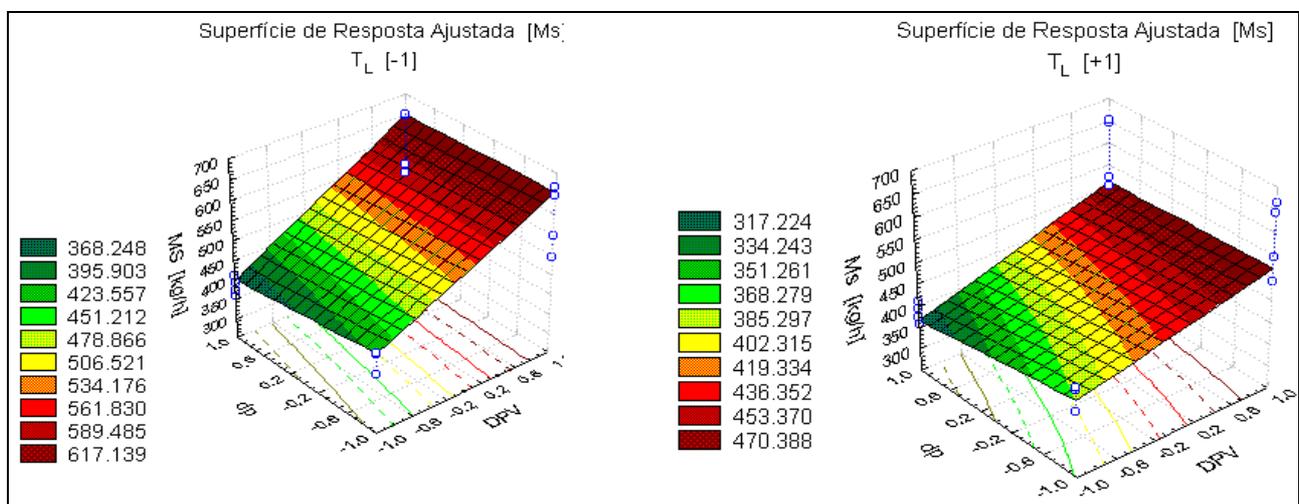


Figura 5. Superfície de Resposta ΔP_v e d_p

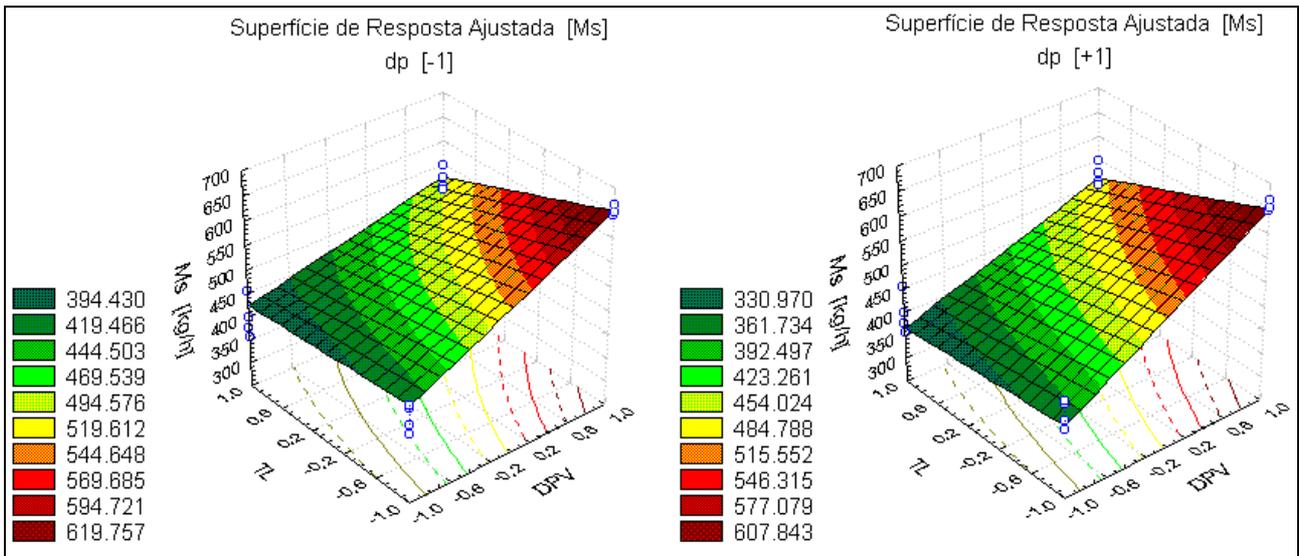


Figura 6. Superfície de Resposta ΔP_v e T_L

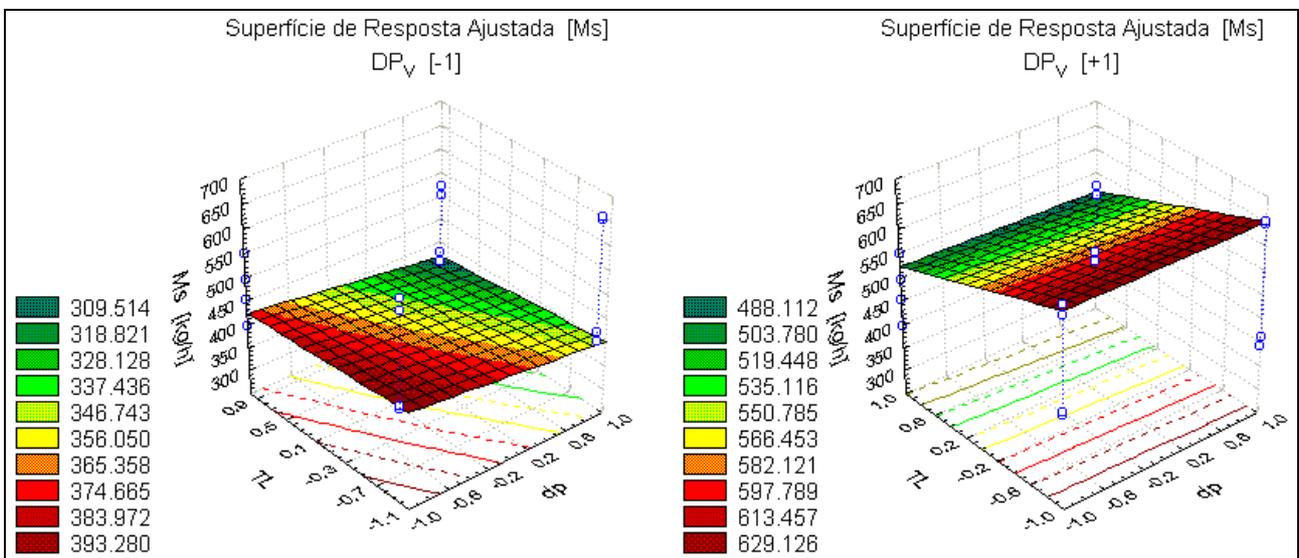


Figura 7. Superfície de Resposta dp e T_L

Os valores apresentados à esquerda de cada uma das superfícies são valores médios de conversão, em determinadas regiões das superfícies, obtidos através da Eq. (4). Há nessas figuras pontos, dispostos verticalmente em cada uma das extremidades das superfícies, que refletem a qualidade do ajuste do modelo proposto. O afastamento apresentado indica que um modelo linear não é o mais recomendado para descrever a descarga de sólidos particulados através da válvula cônica, contudo, pode ser aplicado para obter uma estimativa inicial. O modelo quadrático pode ser aplicado, porém, para o ajuste desse novo modelo há a necessidade de realização de experimentos em pontos axiais e não somente nos níveis superior e inferior de cada um dos fatores. Neste trabalho não foi possível a realização de experimentos em tais pontos.

5. CONCLUSÕES

As metodologias aplicadas neste trabalho, planejamento fatorial e superfície de resposta, foram ferramentas úteis para a obtenção de informações sobre a operação da válvula cônica com um mínimo de experimentos realizados.

A descarga de sólidos particulados através da válvula sofre influência significativa, estatisticamente determinada com nível de confiança de 95%, das três variáveis estudadas: queda de pressão entre as extremidades da válvula, diâmetro médio da partícula e temperatura do leito. Dentre as possíveis combinações entre os fatores principais, somente a interação entre as variáveis queda de pressão entre as extremidades da válvula e temperatura do leito mostrou-se significativa estatisticamente.

A descarga de sólidos através da válvula é diretamente proporcional ao aumento da queda de pressão entre as extremidades da válvula e inversamente proporcional ao aumento do diâmetro médio da partícula e da temperatura do leito.

A metodologia de superfície de resposta permitiu verificar a utilidade do modelo linear para uma primeira estimativa de descarga através da válvula cônica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro na execução deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barros Neto, B., Scarminio, I.S., Bruns, R.E., 1995, "Planejamento e Otimização de Experimentos", Ed. da Unicamp, Campinas, Brasil, 299 p.
- Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S., 1978, "Statistics for Experiments – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building", New Jersey.
- Geldart, D., Haesebrouck, M., 1983, "Studies on the Intermittent Discharge of Coarse Solids from Fluidized Beds", Chemical Engineering Research Design, Vol. 61, No. 4, pp. 224-232.
- Havlicek, L.L., Crain, R.D., 1988, "Practical Statistics for the Physical Sciences", ed. ACS Professional Reference Book, 489 p.
- Khuri, A.I., Cornell, J.A., 1996, "Response Surfaces – Designs and Analyses", ed. Marcel Dekker Inc, 2nd edition. 509 p.
- Kunii, D. Levenspiel, O., 1991, "Fluidization Engineering", ed. Butterworth-Heinemann, 2nd edition. 491 p.
- Morrow, E.W., 1985, "Linking R&D to Problems Experienced in Solids Processing", Chemical Engineering Progress, Vol. 81, No. 5, pp. 14-22, May.
- Mohsenim, N.N., 1970, "Physical Properties of Plant and Animal Materials", In: Structure, physical characteristics and mechanical properties, Bordon and Beach Sci. Pub, New York, 1970.
- Montgomery, D. C., 1997, "Design and Analysis of Experiments" ed. John Wiley & Sons, 4th edition, New York, 704 p.
- Munts, V.A., Baskakov, A.P., Fedorenko, Y.N., Kozlova, Y.G., 1990, "The Circulation Factor in Furnaces with a Circulating Fluidized-Bed", Thermal Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 176-180.
- Sarkar, M., Gupta, S.K., Sarkar, M.K., 1991, "An Experimental Investigation of the Flow of Solids from a Fluidized-Bed through an Inclined Pipe", Powder Technology, Vol. 64, No. 3, pp. 221-231.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRESSURE DIFERENCE BETWEEN THE CONICAL VALVE EXTREMITIES ON THE SOLID MASS FLOW RATE CONTROL.

Júlio César Dainezi de Oliveira
Universidade Estadual de Campinas – dainezi@fem.unicamp.br

Araí Augusta Bernárdez Pécora
Universidade Estadual de Campinas – arai@fem.unicamp.br

Abstract. This paper reports an experimental study of a feed valve, named conical valve, suitable for mass flow rate control of solid particles leaving fluidized bed reactors. Experiments were carried out based on 2^k factorial design and evaluated by a Student t test and Response Surface Methodology. The studied variables were: pressure difference between the conical valve extremities; particle diameter and temperature of the fluidized bed. The range was: 1,37 to 2,75 kPa; 185×10^{-4} to 285×10^{-4} m and 300 to 1123 K, respectively. Results showed that all considered main factors were statistically significant and that the maximum solid mass flow rate through the conical valve obtained for ambient temperature condition. It was also observed that solid mass flow rate was directly proportional to increase in pressure difference between the conical valve extremities.

Keywords: Feed valve; Factorial experimental design; Response Surface Methodology