

## ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA EM LEITO DE JORRO E FLUIDIZADO COM PARTÍCULAS DE SOJA

H. P. FERRAZ<sup>1</sup>, J. H. FERREIRA<sup>1</sup>, F. R. B. D. PORTO<sup>1</sup> e A. B. OLIVEIRA Jr<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNIFEB (Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos), Engenharia Química  
 E-mail para contato: fulvi.porto@gmail.com.br

**RESUMO** – Este trabalho teve por objetivo o estudo das curvas características obtidas em leito de jorro e fluidizado com partículas de soja e a comparação dos dados aos modelos fluidodinâmicos presentes na literatura. Foram pré-determinados os modelos: Becker, Malek e Lu. Os procedimentos fluidodinâmicos foram realizados em protótipos de leito jorro e fluidizado, com fluxo ascendente variando-se as velocidades do ar: 0,1 a 20,4 m/s e massas: 100 a 500 g. A metodologia mostrou-se adequada tanto na construção dos protótipos como nas coletas de dados, pois possibilitaram reprodutibilidade dos mesmos. Notou-se a influência da altura do leito/massa de partículas na velocidade e observou-se que as curvas obtidas em ambos os leitos foram concordantes com as previstas na literatura por RIBEIRO (2005) e SANTOS (2011).

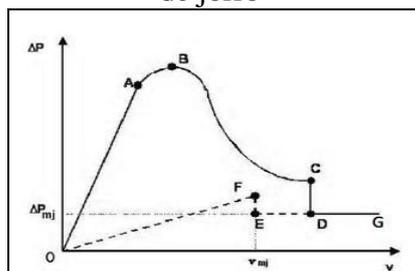
### 1. INTRODUÇÃO

A fluidização é um processo no qual sólidos particulados são colocados em suspensão através de um fluido que pode ser um gás ou um líquido. (TAYLOR e HARMAN, 1990, apud ALMEIDA e ROCHA, p.1).

Segundo GARIM (1998), para o estudo da fluidodinâmica dos leitos é necessário ter-se preliminarmente a sua curva característica (queda de pressão em função da velocidade média do fluido antes do distribuidor) (OLIVEIRA, 2003, p.7).

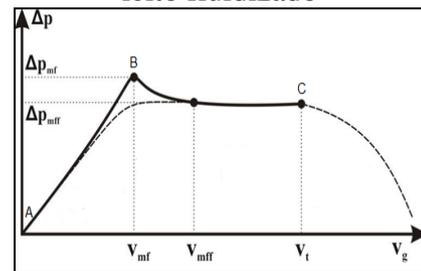
A curva característica representa fisicamente a transição entre um leito estático e um leito de jorro estabelecido, sendo os trechos da curva ilustrados na Figura 1 (MATHUR e EPSTEIN 1974, apud SANTOS, 2011, p.6). O comportamento de um leito fluidizado apresenta uma curva característica que pode ser observado na Figura 2, sendo descrito por regiões bem definidas. (COUDERC, 1985, apud RIBEIRO, 2005, p.9)

**Figura 1** – Curva característica de um leito de jorro



FONTE: BARCELOS 2006,  
 apud SANTOS, 2011

**Figura 2** – Curva característica de um leito fluidizado



FONTE: KUNII E LEVENSPIEL, 1991,  
 apud MELE, J., 2011

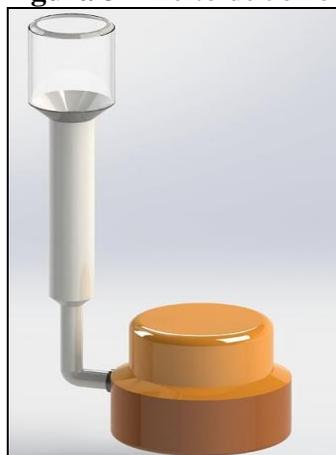
Para a realização deste estudo foram construídos dois protótipos, sendo eles, um leito de jorro e um leito fluidizado. Utilizou-se como sistema particulado grãos de soja, e os parâmetros analisados foram: velocidade do fluido antes do distribuidor em ambos os leitos e massa de partículas/altura do leito.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção das informações experimentais foi utilizado um soprador da marca GE de 127 V, com inversor de frequência para a regulagem da velocidade do fluido, obtida através de um anemômetro ST8020 LCD antes distribuidor posicionado abaixo do leito de partículas. Para cálculo utilizou-se a velocidade média como citado por BRUNETTI (2010), adotando em cada ponto a média das velocidades em relação ao tempo. A perda de carga foi aferida através de um manômetro em U utilizando como fluido manométrico água com corante vermelho, a nivelção do leito foi obtida através de um nível de bolha.

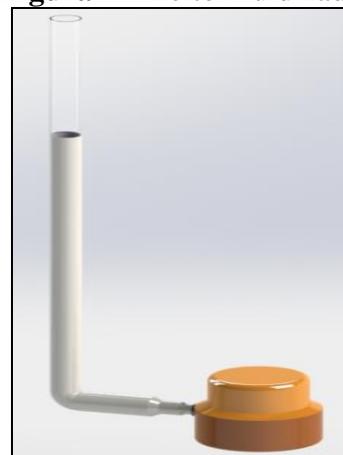
Para construção dos leitos usou-se tubulação de PVC de diversos diâmetros para fração de área livre, junto a estes, acessórios como joelhos, luvas e reduções. Como distribuidor utilizou-se tecido filó antes do início dos leitos. Foi adquirido um funil de calha de zinco com 44,3° de inclinação e um recipiente cilíndrico de plástico com 14,46 cm de diâmetro e 17,06 cm de altura para o leito de jorro, conforme Figura 3. Para o leito fluidizado foi usado um porta copos de plástico com 7,47 cm de diâmetro e 45,51 cm de altura conforme Figura 4.

**Figura 3 – Leito de Jorro**



FONTE: Autores

**Figura 4 – Leito Fluidizado**



FONTE: Autores

Foram realizados os testes com grãos de soja industrializados (*Glycine max*), com diâmetro médio de partícula de 5,39 mm, calculado pela Equação 1 descrita por TANNOUS, sendo possível obter a esfericidade de 0,91 através da Equação 2, e o diâmetro equivalente pela Equação 3. Para determinação da densidade aparente, utilizou-se o princípio de Arquimedes para calcular o volume da semente, sendo este pelo deslocamento de água em uma proveta graduada, foram utilizadas 100 sementes, e dividido por sua quantidade para cálculo do volume, como na Equação 4. A porosidade de 0,61 foi obtida pela Equação 5 de CREMASCO (2012), determinando-se a massa do grão utilizando a balança analítica. A densidade real da semente foi calculada através da massa pelo seu volume. E para obtenção da densidade aparente, colocou-se em uma proveta de 250 ml uma quantidade de semente até atingir sua marca, em seguida com a proveta tarada pesou-se para encontrar a massa de

semente e dividiu pelo volume ocupado na proveta. Todas as coletas foram realizadas em triplicata. A Tabela 1 apresenta as equações utilizadas.

**Tabela 1** – Propriedades físicas calculadas

Autor	Equação	Numeração
Tannous	$d_{ps} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}}$	(1)
	$d_{pi} = d_{sq} \cdot \Phi$	(2)
	$V_p = \frac{\Delta V}{n^{\circ} \text{ de partículas}}$	(3)
Arquimedes	$d_{sq} = \left( \frac{6}{\pi} V_p \right)^{\frac{1}{3}}$	(4)
Creмасco	$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p}$	(5)

Para a determinação da fluidodinâmica dos leitos foi elaborado um procedimento operacional padrão de forma a minimizar os erros experimentais e possibilitar a reprodutibilidade das informações experimentais. A queda de pressão foi aferida em função da vazão carregando os leitos com uma massa de grãos/altura do leito, os testes foram realizados variando a vazão de ar nos leitos, sendo esta medida antes do distribuidor.

Para cada vazão obteve-se a diferença de altura no manômetro para o cálculo da perda de pressão através Lei de Stevin (Equação 6). Repetiu-se o teste variando-se a massa do sistema particulado. Através da Equação 7 de PALLAI e NEMETH (1969), obteve-se a máxima queda de pressão teórica possível no leito de jorro, e com a Equação 8 de MALEK e LU (1965), obteve-se a máxima queda de pressão teórica possível no leito fluidizado.

Para se determinar a queda de pressão mínima no leito fluidizado utilizou-se a Equação 10 de BECKER (1961), onde foi necessário determinar porosidade mínima de fluidização (Equação 11), altura do leito na mínima fluidização (Equação 12) e volume total de partículas na mínima fluidização (Equação 13). A queda de pressão mínima em leito de jorro é determinada através da Equação 14, descrita por MASSARANI (1987). A Equação 15 determina o desvio relativo entre a perda de carga teórica e experimental. As equações citadas acima se encontram na Tabela 2.

**Tabela 2** – Equações para a determinação da fluidodinâmica dos leitos

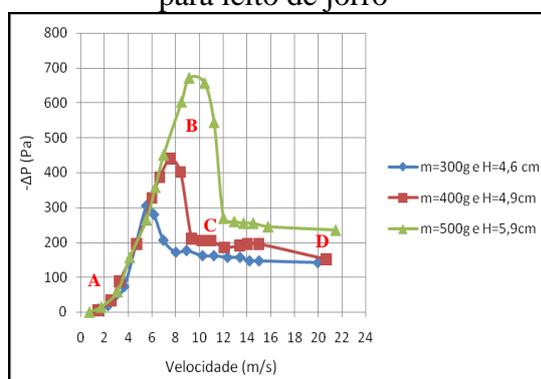
Autor	Equação	Numeração
Lei de Stevin	$\Delta P = \rho_f \cdot g \cdot h$	(6)
Pallai e Nemeth (1969)	$-\Delta P_{max} = (\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon) \cdot H_o \cdot g$	(7)
Malek e Lu (1965)	$-\Delta P_{max} = \frac{g \cdot m_p}{\text{Área}}$	(8)
	$\text{Área} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$	(9)
Becker (1961)	$\Delta P_{min} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot L_{mf}$	(10)
	$\Phi \cdot \varepsilon_{mf} = \frac{1}{14}$	(11)
	$V_{tmf} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{mf}$	(12)
	$V_{tmf} = \frac{V_p}{(1 - \varepsilon_{mf})}$	(13)
Massarani (1987)	$\Delta P_{min} = 0,67 \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot H_o \cdot \rho \cdot g$	(14)
	$\text{Desvio relativo} = \frac{ V_T - V_E }{V_E} \cdot 100$	(15)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas obtidas para o leito de jorro (Figura 5) são semelhantes às curvas apresentadas na literatura (Figura 1), onde no intervalo AB nota-se leito estático, com baixa velocidade do fluido que apenas passa entre as partículas sem as perturbar e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás. Aumentando-se a velocidade do fluido, há uma diminuição gradativa da queda de pressão devido ao aumento do jorro interno e formação do jorro incipiente, como no trecho BC. Prosseguindo com o aumento da velocidade atinge-se o jorro estável, onde a perda de carga se estabiliza como no intervalo CD (MATHUR e EPSTEIN 1974, apud SANTOS, 2011, p.6). Notou-se influência da altura do leito/massa de partículas na velocidade mínima de jorro, esta aumentou juntamente com a altura do leito/massa de partículas assim como a perda de carga.

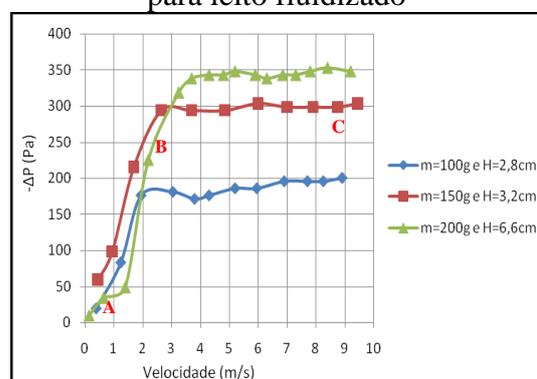
As curvas obtidas para leito fluidizado (Figura 6) são semelhantes às curvas apresentadas (Figura 2), onde a região AB corresponde a um leito fixo, e a queda de pressão aumenta à medida que aumenta a velocidade. No ponto B nota-se o começo da fluidização. Com o aumento da velocidade, a queda de pressão estabiliza-se e permanece constante como observado em BC (COUDERC, 1985, apud RIBEIRO, 2005, p.9). Houve influência da altura do leito/massa de partículas na perda de carga, que aumentou proporcionalmente com a altura dos leitos, já na velocidade mínima de fluidização não houve grande influência.

**Figura 5** - Curvas características obtidas para leito de jorro



FONTE: Autores

**Figura 6** – Curvas características obtidas para leito fluidizado



FONTE: Autores

Na Tabela 3 são apresentados os dados experimentais e os teóricos para leito de jorro, juntamente com o desvio relativo obtido, onde a massa específica do fluido é de  $1,179 \text{ kg/m}^3$  e a massa específica da partícula é de  $1742,9 \text{ kg/m}^3$ .

**Tabela 3** - Dados coletados para leito de jorro

$\epsilon_{mf}$	$H_o$ (m)	$-\Delta P_{min}$ teórico (Pa)	$-\Delta P_{min}$ exp (Pa)	Desvio Relativo (%)
0,52	0,047	258,4374	235,2	9,88
0,52	0,045	247,4400	215,6	14,77
0,52	0,050	274,9334	205,8	33,60
0,52	0,049	269,4347	215,6	24,97
0,52	0,060	329,9201	264,6	24,69
0,52	0,059	324,4214	274,4	18,23

Os dados experimentais e teóricos para leito fluidizado são apresentados na Tabela 4, juntamente com o desvio relativo obtido.

**Tabela 4 – Dados coletados para leito fluidizado**

$\xi_{mf}$	$m_p$ (kg)	$L_{mf}$ (m)	$V_p$ (m <sup>3</sup> )	$V_{tmf}$ (m <sup>3</sup> )	$-\Delta P_{min}$ teórico (Pa)	$-\Delta P_{min}$ exp (Pa)	Desvio Relativo (%)
0,52	0,10004	0,02730	5,74E-05	1,20E-04	223,8917	186,2	20,24
0,52	0,10007	0,02731	5,74E-05	1,20E-04	223,9588	176,4	26,96
0,52	0,15008	0,04095	8,61E-05	1,79E-04	335,8823	294,0	14,25
0,52	0,15008	0,04095	8,61E-05	1,79E-04	335,8823	294,0	14,25
0,52	0,20007	0,05460	1,15E-04	2,39E-04	447,7610	313,6	42,78
0,52	0,20015	0,05462	1,15E-04	2,39E-04	447,9400	323,4	38,51

Na comparação entre as máximas quedas de pressão experimentais e calculadas obteve-se um desvio relativo médio de 21,02% para leito de jorro e 26,16% para leito fluidizado, resultados semelhantes foram obtidos por ALMEIDA, A e ROCHA, S. C. S. (2016). Os desvios relativos devem ser abaixo de 20%, pois estes são satisfatórios de acordo com ALMEIDA, A e ROCHA, S. C. S. Atribui-se os valores superiores ao considerado satisfatório devido a fatores como as condições de contorno das equações utilizadas não serem compatíveis às experimentais, como por exemplo, o ângulo de inclinação do cone do leito de jorro não ser de 60°, não uniformidade das partículas, expansão do leito quando a velocidade se aproxima da velocidade de mínima fluidização e tendência das partículas se agregarem.

#### 4. CONCLUSÃO

A metodologia mostrou-se adequada tanto na construção dos protótipos quanto nas coletas de dados, pois possibilitaram reprodutibilidade dos mesmos. Notou-se grande semelhança das curvas características experimentais de ambos os leitos com as presentes na literatura. No estudo fluidodinâmico dos leitos com partículas de soja houve influência da altura do leito/massa de partículas na perda de carga de ambos os leitos, estas aumentaram proporcionalmente com a altura dos leitos, como descrito na literatura. Observou-se influência da altura do leito/massa de partículas na velocidade mínima de jorro, que aumentou juntamente com o aumento da altura do leito/massa de partículas. Não houve grande influência da altura do leito/massa de partículas na velocidade mínima de fluidização.

#### 5. NOMENCLATURA

**Tabela 5 – Nomenclatura**

Símbolo	Descrição	Unidade	Símbolo	Descrição	Unidade
<b>D</b>	Diâmetro do leito	m	<b><math>d_{eq}</math></b>	Diâmetro equivalente	m
<b><math>V_{mf}</math></b>	Velocidade mínima de fluidização	m/s	<b><math>\emptyset</math></b>	Esfericidade	-
<b><math>H_0</math></b>	Altura do leito fixo	m	<b><math>\Delta V</math></b>	Variação de volume	m <sup>3</sup>
<b><math>-\Delta P</math></b>	Queda de pressão	Pa	<b><math>\epsilon</math></b>	Porosidade para leito fixo	-
<b>d</b>	Diâmetro da partícula	m	<b><math>\rho_f</math></b>	Densidade do fluido	kg/m <sup>3</sup>
<b><math>V_{mj}</math></b>	Velocidade mínima de jorro	m/s	<b>g</b>	Gravidade	m/s <sup>2</sup>
<b><math>-\Delta P_{min}</math></b>	Queda de pressão na min fluidização	Pa	<b>h</b>	Diferença da altura do líquido	m
<b><math>-\Delta P_{max}</math></b>	Queda de pressão máxima	Pa	<b><math>\epsilon_{mf}</math></b>	Porosidade mínima de fluidização	-
<b><math>-\Delta P_{mj}</math></b>	Queda de pressão no mínimo jorro	Pa	<b><math>m_p</math></b>	Massa de partículas	kg
<b><math>-\Delta P_{mf}</math></b>	Queda de pressão na min fluidização	Pa	<b><math>V_{tmf}</math></b>	Volume de partículas na min. fluidização	m <sup>3</sup>
<b><math>-\Delta P_{mff}</math></b>	Queda de pressão na total fluidização	Pa	<b><math>L_{mf}</math></b>	Altura do leito na mínima fluidização	m
<b><math>d_{pi}</math></b>	Diâmetro médio da partícula	m	<b><math>V_p</math></b>	Volume da partícula	m <sup>3</sup>
<b><math>d_{ps}</math></b>	Diâmetro médio de Sauter	m	<b>VT</b>	Valor teórico	-
<b><math>\xi_i</math></b>	Fração mássica retida	-	<b>VE</b>	Valor experimental	-
<b><math>V_p</math></b>	Volume da partícula	m <sup>3</sup>	<b><math>V_t</math></b>	Velocidade terminal	m/s

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A., ROCHA, S. C. S. Scielo: *Fluidodinâmica de semente de brócolis em leito fluidizado e de jorro*. Campinas: UNICAMP – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2001. Artigo (Iniciação científica).

BRUNETTI, F. *Mecânica dos fluidos*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

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

MARRETO, R. N. *Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina*. Ribeirão Preto: USP – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, 2006. Tese (Doutorado).

MELE, J. Cdn: *Scale-up of a cold flow model of FICFB biomass gasification process to an industrial pilot plant – example of dynamic similarity*. Slovenia: Faculty of mechanical engineering, 2011.

OLIVEIRA, A. B. O. *Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado*. São Carlos: UFSCAR – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado).

RIBEIRO, M. S. *Estudo fluidodinâmico de um leito fluidizado pulsado rotativo com partículas secas e úmidas*. Campinas: UNICAMP – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Dissertação (Mestrado).

SANTOS, D. A. *Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – estudos experimentais e de simulação via CFD*. Uberlândia: UFU - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2011. Dissertação (Mestrado).

TANNOUS, K., ROCHA, S. C. S. Unicamp: *Capítulo III – Escoamento em meios porosos*. Disponível em: <[https://www.ggte.unicamp.br/ocw/sites/ocw/files/cursos/CienciasExatas/EQ651/apostilas/Capitulo\\_III.pdf](https://www.ggte.unicamp.br/ocw/sites/ocw/files/cursos/CienciasExatas/EQ651/apostilas/Capitulo_III.pdf)> Acesso 16 set. 2016.

TECNOLOGIA DA FLUIDIZAÇÃO. *Tecnologia da fluidização: Leito fluidizado*. Disponível em: <<http://www.fluidizacao.com.br>>. Acesso em 2 set. 2016.