

DESENVOLVIMENTO, COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE MODELOS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO.

A. S. PEREIRA¹, M. L. MAGALHÃES¹, J. A. M. LEMOS¹ e S. J. M. CARTAXO¹

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: samuel@ufc.br

RESUMO – O transporte pneumático utiliza correntes de gás para a movimentação de material particulado, o que lhe confere notada importância industrial, na medida em que muitas indústrias necessitam realizar a movimentação de cargas de material sólido. Diante disso, a elaboração de modelos matemáticos com vistas à simulação computacional se torna uma atividade que contribui para a redução de custos. O objetivo deste trabalho é realizar a modelagem matemática de um processo de transporte pneumático vertical para o estudo das variáveis operacionais de maior influência, comparativamente a modelos consagrados na literatura técnica. Foram realizadas simulações em software livre Python e seus módulos, de modo a avaliar a implementação de modelos matemáticos diversificados, tais como o uso da equação empírica de Ergun ou a equação de estado para gases ideais para resolver a pressão do sistema. A validação do modelo foi realizada de forma comparativa com estudos de casos reportados na literatura, e observou-se que o modelo que utiliza a equação de estado para prever a variação de pressão se mostrou mais satisfatório e confiável. Os resultados mostram a influência das propriedades do fluido/partícula, os perfis de velocidades do fluido e das partículas e o perfil da queda de pressão.

1. INTRODUÇÃO

O arraste de material particulado através de tubulações, por meio de uma corrente gasosa, é uma operação unitária que ficou conhecida como transporte pneumático (Figura 1). Sua utilização é crescente e tornou-se comum desde a década de 20 (Klinzing *et al.*, 1997).

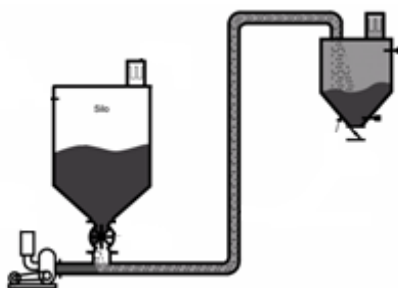


Figura 1 – Transporte pneumático. Fonte: Dynamic Air - Conveying Systems (2005).

O transporte pneumático possui diversificada aplicação industrial, sendo algumas citadas por Marcus *et al.* (1990): craqueamento catalítico, combustão, produção de propileno, secagem, processamento de minério, indústrias alimentícias e farmacêuticas. Isso se deve à versatilidade no deslocamento de materiais sólidos, transporte limpo e isento de perdas, baixo custo de manutenção, fácil operação e excelente contato entre as fases gás-sólido.

Para projetar um sistema de transporte pneumático eficiente, faz-se necessário conhecer sua queda de pressão, a velocidade do gás de transporte e das partículas transportadas. Cabrejos *et al.* (1992) afirma que a velocidade mínima de transporte é um dos parâmetros mais importantes e que deve ser estimado para evitar elevados custos devido ao grande consumo de energia.

Neste trabalho serão apresentados modelos macroscópicos, para o transporte vertical, baseados na fluidodinâmica do sistema gás-sólido, utilizando fundamentos da mecânica dos fluidos e princípios termodinâmicos.

As suposições realizadas para o modelo unidimensional em regime permanente são: sistema isotérmico sem transferência de massa entre as fases; tamanho das partículas é uniforme possuem mesma massa específica; partículas de mesmo diâmetro e densidades como uma fase contínua; e fase particulada incompressível. Sob estas hipóteses, foi desenvolvida uma versão modificada do modelo proposto por Gidaspow (1994), conforme abaixo.

1.1. Equações da Continuidade

Fase gasosa:

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot \varepsilon \cdot v_g)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\left(\varepsilon \cdot \rho_g \cdot \frac{\partial(v_g)}{\partial z} + v_g \cdot \rho_g \cdot \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial z} + \varepsilon \cdot v_g \cdot \frac{\partial(\rho_g)}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

Fase particulada:

$$\frac{\partial(\rho_p \cdot (1-\varepsilon) \cdot v_p)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\rho_p \cdot \left((1-\varepsilon) \cdot \frac{\partial(v_p)}{\partial z} - v_p \cdot \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

1.2. Equações do Momentum

Fase gasosa:

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot \varepsilon \cdot v_g^2)}{\partial z} = - \frac{\partial(\varepsilon \cdot P)}{\partial z} - F_{Dz} - F_{Gg} \quad (5)$$

$$2 \cdot \rho_g \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial(v_g)}{\partial z} + \rho_g \cdot v_g^2 \cdot \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial z} + \varepsilon \cdot v_g^2 \cdot \frac{\partial(\rho_g)}{\partial z} + \varepsilon \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + P \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + F_{Dz} + F_{Gg} = 0 \quad (6)$$

Fase particulada:

$$\frac{\partial(\rho_p \cdot (1-\varepsilon) \cdot v_p^2)}{\partial z} = - \frac{\partial((1-\varepsilon) \cdot P)}{\partial z} + F_{Dz} - F_{Gp} \quad (7)$$

$$2 \cdot \rho_p \cdot (1-\varepsilon) \cdot \frac{\partial(v_p)}{\partial z} - \rho_p \cdot v_p^2 \cdot \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial z} + (1-\varepsilon) \cdot \frac{\partial P}{\partial z} - P \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - F_{Dz} + F_{Gg} = 0 \quad (8)$$

1.3. Equações Constitutivas

Fase gasosa:

Equação de estado

$$\rho_g = \frac{MM}{R \cdot T} \cdot P \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{R \cdot T}{MM} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial z} \quad (10)$$

Equação de Ergun (1952)

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1.75 \rho_g}{d_p} (1-\varepsilon) (v_g - v_p)^2 + \frac{150 \mu_g}{\varepsilon \cdot d_p^2} (1-\varepsilon)^2 (v_g - v_p) \quad (11)$$

Fase particulada:

$$\rho_p = \rho_{p0} = \text{const} \quad (12)$$

1.4. Forças

Para este modelo, foram consideradas a força gravitacional e a força de arraste. Gidaspow (1994) propôs que a força gravitacional age de forma proporcional a massa da partícula e que a força de arraste é correlacionada dependendo da porosidade do sistema. Para a fase densa, a força de arraste pode ser obtida pela Equação de Ergun (1952) e para a fase dispersa pela equação de Richardson e Zaki (1954), que estima o coeficiente de arraste gás-partícula como função do número de Reynolds (Rowe e Henwood, 1961).

Força de arraste:

$$F_{Dz} = \frac{1.75 \rho_g}{d_p} (1-\varepsilon) (v_g - v_p)^2 + \frac{150 \mu_g}{\varepsilon \cdot d_p^2} (1-\varepsilon)^2 (v_g - v_p) \quad 0.2 \leq \varepsilon < 0.8 \quad (13)$$

$$F_{Dz} = \frac{3}{4} \frac{C_{dz} \cdot (1-\varepsilon) \varepsilon^{-2.67} \cdot (v_g - v_p) \cdot |v_g - v_p| \cdot \rho_g}{d_p} \quad 0.8 \leq \varepsilon \quad (14)$$

Fase gasosa:

$$F_{Gg} = \varepsilon \cdot \rho_g \cdot g \quad (15)$$

Fase particulada:

$$F_{Gp} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot g \quad (16)$$

2. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE MODELOS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Observa-se que o modelo proposto possui cinco equações diferenciais e cinco variáveis, sendo elas: porosidade, densidade do gás, velocidade do gás, velocidade da partícula e pressão. Para resolver o sistema de equações foi utilizado framework numérico Python e seus módulos interfaceados através do IPython Notebook.

Em caráter comparativo dos modelos diferenciais desenvolvidos neste trabalho, foi selecionado como benchmark o estudo de caso experimental de Zenz (1949), referenciado por Arastoopour e Gidaspow (1979). Todos os parâmetros relativos ao sistema de transporte pneumático estão apresentados na Tabela 1, assim como as condições iniciais na Tabela 2.

Tabela 1 – Dados dos experimentos.

ρ_p (Kg/m ³)	μ_g (Pa.s)	$D. do tubo$ (m)	L (m)	d_p (m)	MM (Kg/mol)	T (K)
$1.84 \cdot 10^{-5}$	$1.67 \cdot 10^{-3}$	$4.45 \cdot 10^{-2}$	1.20	$1.67 \cdot 10^{-3}$	0.029	303.15

Tabela 2 – Condições iniciais dos experimentos.

ρ_g (Kg/m ³)	v_g (m/s)	v_p (m/s)	ε	P (Pa)
3.03	25.0	0.56	0.9	$26.4 \cdot 10^4$

A Figura 2 ilustra o comportamento axial dos experimentos de Zenz (1949) para o modelo desenvolvido por Arastoopour e Gidaspow (1979). As simulações mostradas na Figura 3 apresentam notáveis diferenças no comportamento dos perfis de velocidades gás/partícula, onde: (a) desconsidera-se a variação de pressão e utiliza-se a correlação empírica de Ergun, comumente empregada para descrever a variação de pressão por unidade de comprimento, na força de arraste e (b) princípios termodinâmicos para prever a variação da pressão no sistema; (c) apresenta o modelo desenvolvido por Adewunmi e Arastoopour (1986), que considera o gradiente de pressão apenas na fase gasosa.

Observa-se que o modelo que emprega a equação de Ergun não se mostrou adequado para o sistemas de transporte pneumático, indo de encontro a física do processo. Os modelos que utilizam a equação de estado, quando comparado a Figura 2, mostraram-se mais satisfatórios, sendo o modelo diferencial desenvolvido neste trabalho o que apresentou mesmo comportamento nos perfis de velocidades e pequenos desvios nas velocidades finais.

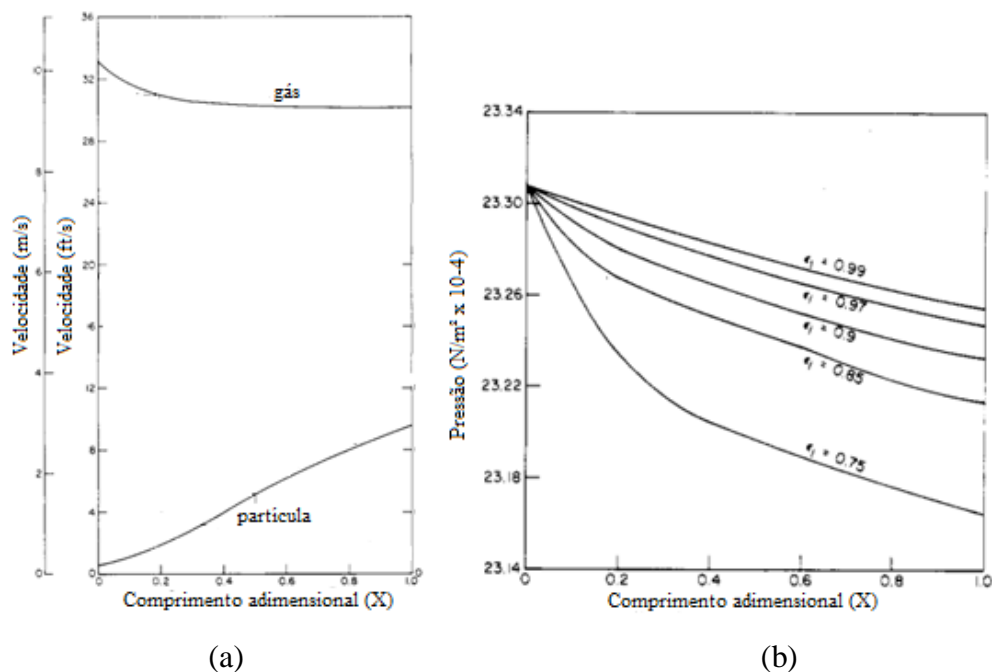


Figura 2 – Modelo desenvolvido por Arastoopour e Gidaspow (1978) que prevê o comportamento axial dos experimentos de Zenz (1949); (a) Perfis de velocidades e (b) Perfil de Pressão.

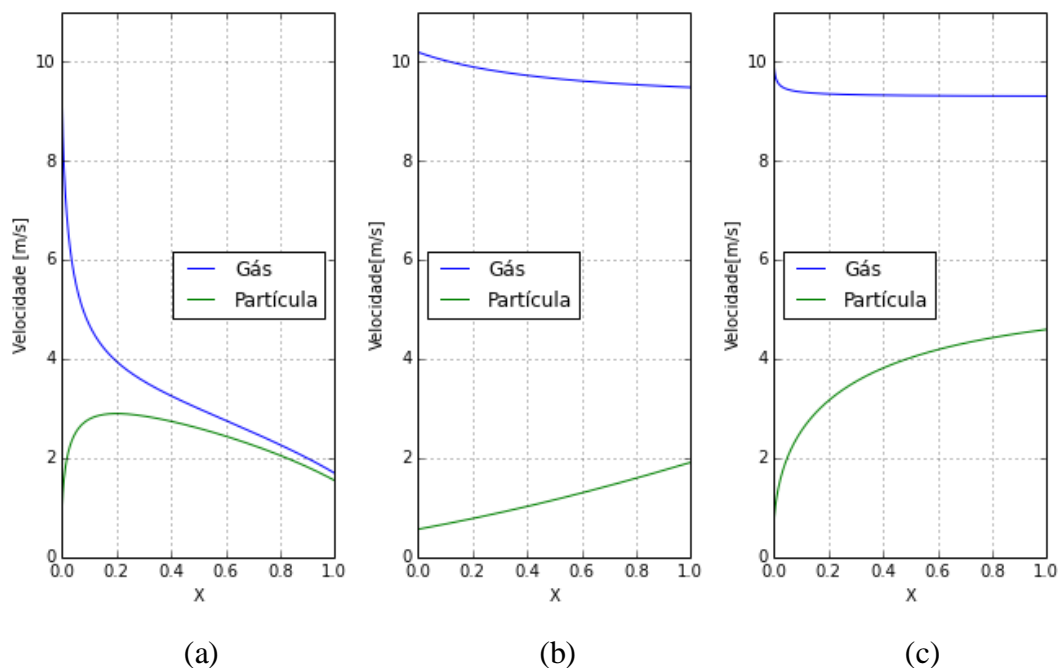


Figura 3 – Perfis de velocidades (a) Equação de Ergun; (b) Equação de estado e (c) Modelo de Adewunmi e Arastoopour (1986), considerando somente a variação axial.

A seguir, são mostrados na Figura 4, os perfis da porosidade, densidade e pressão para o modelo dinâmico validado. No sistema experimental, a pressão registrada foi constante, e consequentemente não se determinou o efeito da densidade do gás. O resultado obtido confirma que a variação da pressão para esse sistema é muito pequena, mas podem-se perceber os efeitos da densidade no gás no perfil da queda de pressão.

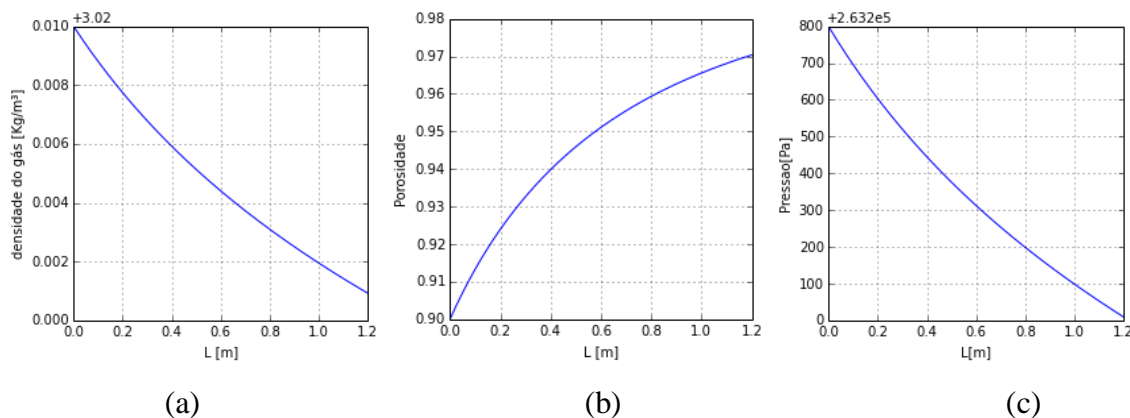


Figura 4 - Perfil da (a) Densidade do gás; (b) Porosidade e (c) Pressão.

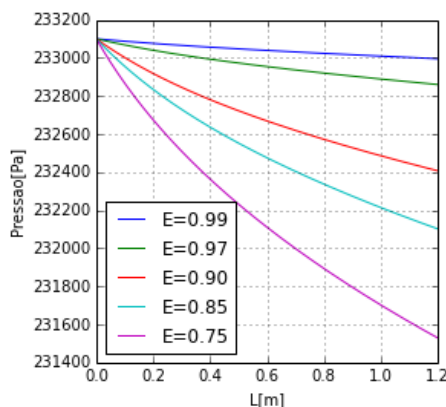


Figura 5 – Comportamento da pressão com variação da porosidade.

A Figura 5 apresenta o comportamento da pressão com a variação da porosidade, que condiz com os experimentos de Zenz (1949) e pode ser explicado através da força de arraste. Quando é feito o transporte em fase densa (porosidade < 0.8), a força de arraste é maior, quando comparada a fase dispersa, ocasionando uma maior perda de pressão. Conclui-se que quanto menor a porosidade, maior a variação de pressão para o mesmo comprimento.

Outro estudo de caso foi realizado comparando o modelo desenvolvido por Theologos e Markatos (1994) para os dados experimentais de Hariu e Molstad (1949). Verifica-se pela Figura 6, que o modelo diferencial estudado não apresenta desvios exacerbados, podendo ser consequência do nivelamento pela média radial. Experimentalmente, o valor obtido para a pressão depois de 1.026 m foi de 149 Pa, mostrando a influência da variação das propriedades ao longo do raio.

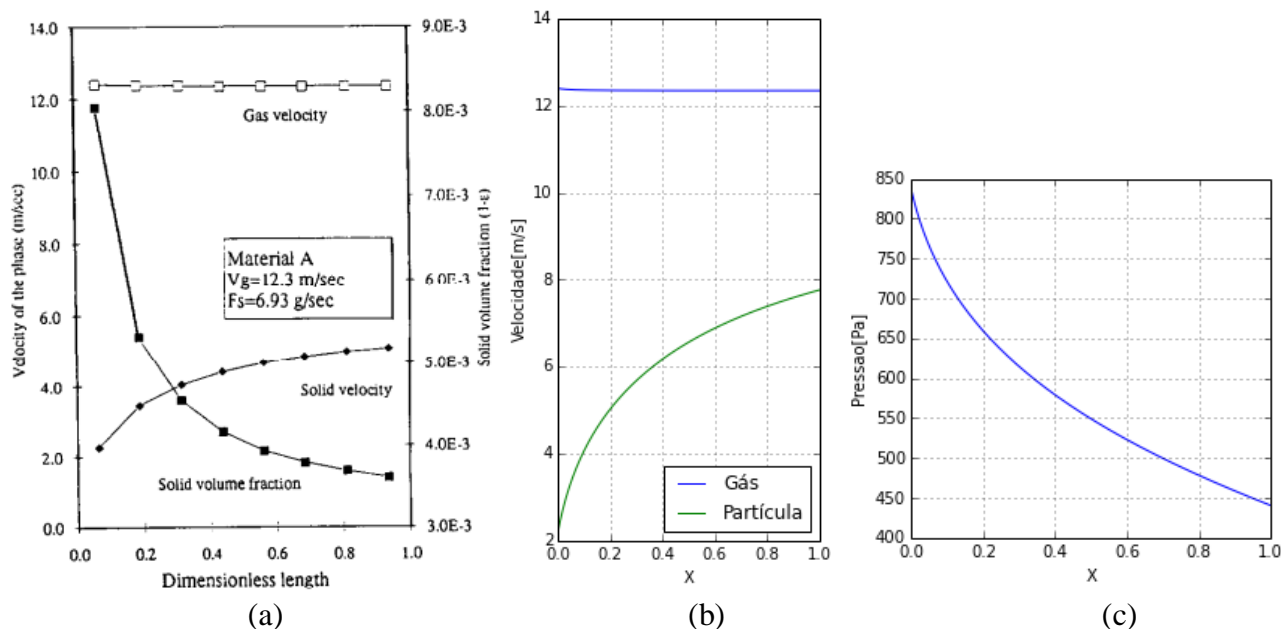


Figura 6 – (a) Perfil de velocidade para os experimentos de Hariu e Molstad (1949); (b) Perfil de velocidade para o modelo desenvolvido neste trabalho; (c) Perfil de pressão.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho explorou possibilidades de modificação do modelo matemático de transporte pneumático proposto por Gidaspow (1994). Os resultados foram comparados com dados experimentais reputados como confiáveis de Zenz (1949) e de Hariu e Molstad (1949). A representação da queda de pressão ao longo do tudo foi realizada por meio de equação de estado e da equação de perda de carga de Ergun. Os perfis de velocidade obtidos usando-se a equação de Ergun não se mostraram fisicamente realistas. A validação do modelo matemático foi satisfatória e compatível com os resultados fornecidos pela modelagem de Gidaspow (1994).

6. NOMENCLATURA

C_{dz} = coeficiente de arraste axial

d_p = diâmetro da partícula (m)

F_{Dz} = força de arraste na direção axial (Pa/m)

F_{Gg} = força gravitacional para o gás (Pa/m)

F_{Gp} = força gravitacional para a partícula (Pa/m)

v_g = velocidade do gás (m/s)

v_p = velocidade da partícula (m/s)

ε = porosidade

ρ_g = densidade do gás (kg/m³)

ρ_p = densidade da partícula (kg/m³)

μ_g = viscosidade do gás (Pa s)

6. REFERÊNCIAS

- ADEWUMI, M. A.; ARASTOPOUR, H. Two-Dimensional Steady State Hydrodynamic Analysis of Gas-Solids Flow in Vertical Pneumatic Conveying Systems, *J. Chem. Phys.*, v. 31, p. 459-466, 1986.
- ARASTOPOUR, H.; GIDASPOW, D. Vertical Pneumatic Conveying Using Four Hydrodynamic Models. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, v. 18, p. 123-130, 1979.
- CABREJOS, F. J. and KLINZING, G. E. Incipient motion of solid particles in horizontal Pneumatic conveying. *Powder Technology*. v. 72, p.51-61, 1992.
- DYNAMIC AIR LTDA. Conveying Systems. Nazaré Paulista, *Princípios fundamentais do transporte pneumático*, São Paulo: Bulletin 9515-4-BR, 2005.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, v.48, p.89-94, 1952.
- GIDASPOW, D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*, Boston: Academic Press Inc., 1994.
- HARIU, O. H.; MOLSTAD, M. C. Pressure drop in vertical tubes vertical tubes in transport of solids by gases. *Ind. Eng. Chem.*, v. 41, p. 1148-1160, 1949.
- KLINZING, G. E.; MARCUS, R. D.; RIZK, F.; LEUNG, L. S. *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach*. London: Chapman & Hall, 1997.
- MARCUS R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F. *Pneumatic conveying of solids. a theoretical and practical approach*. London: Chapman and Hall, 1990.
- RICHARDSON, J. F.; ZAKI, W. N. Sedimentation and Fluidization: Part I. *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, v. 32, nº 35, 1954.
- ROWE, P.N. Drag forces in a hydraulic model of a fluidised bed – part II, *Trans. Instn. Chem. Engrs*, v.39, p.175-180, 1961.
- THEOLOGOS, K. N.; MARKATOS, N. C. Modelling of vertical pneumatic-conveying hydrodynamics. *Appl. Math. Modelling*, v. 18, p. 306-320, 1994.
- ZENZ, F. A.; Two-phase fluid-solid flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 41, p. 20801-2806, 1949.