



AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE *SCALE-DOWN* APLICADOS A SEPARADORES CICLÔNICOS

Marcos Donizete Lopes

Leonardo Goldstein Jr

Fábio Luís Fassani

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

13083-970 Campinas, SP

Resumo. Neste trabalho, o conjunto completo de números adimensionais foi estabelecido para estudar as leis de escala de separadores ciclônicos. Este método foi utilizado como referência para analisar a validade de métodos empíricos, como os parâmetros de Lapple e de Stairmand. Foi avaliada a faixa de condições experimentais em que esses métodos são aplicáveis. Foi observado que o rendimento de coleta obtido por estes métodos difere em até 4 por cento da referência, enquanto que as perdas de pressão exibem desvios maiores que 100 por cento.

Palavras-chave: Ciclones, Separador, Escoamento Gás- Sólido, Scale-Up

1. INTRODUÇÃO

Entre os equipamentos de separação do tipo centrífugo, o mais amplamente usado é o separador ciclônico, usado para separar poeiras ou névoas de um gás. Isto se deve a que os ciclones são simples de construir, baratos, relativamente econômicos de operar, e adaptáveis a uma larga faixa de condições de operação. Embora sejam ineficientes para coletar partículas pequenas, menores do que 5 μm de diâmetro, há mais de um século têm sido muito utilizados pela indústria.

Estudos sistemáticos têm sido desenvolvidos desde a década de 40, para calcular a queda de pressão (ΔP) e a eficiência de coleta de resíduos (η), na tentativa de prever com maior precisão o desempenho de um ciclone.

O desempenho de ciclones de porte industrial pode ser estimado através de modelos empíricos, de modelos matemáticos – a partir das equações da fluidodinâmica –, da realização de medições no próprio ciclone de interesse, e através de testes em unidades construídas em escala laboratorial, que simulem as condições da unidade real.

Os modelos empíricos são baseados em informações experimentais obtidas em faixas limitadas de tamanho e condições operacionais, e sua aplicação em situações diferentes das faixas estudadas pode acarretar erros, que podem ser aceitáveis ou não, dependendo da

precisão requerida. Esses modelos constituem a ferramenta mais usual para a estimativa do desempenho dos ciclones.

Os modelos matemáticos são criados a partir das equações da dinâmica do escoamento nos ciclones, e são acoplados a métodos numéricos computacionais. A precisão dos resultados obtidos depende da sofisticação do modelo elaborado e das características do próprio método numérico. Custos computacionais elevados podem ser necessários para gerar resultados confiáveis.

A instrumentação de um ciclone de porte industrial é difícil pois este pode estar localizado em regiões de difícil acesso, como, por exemplo, dentro de um reator, e estar submetido a condições severas de pressão e temperatura. Além disso, o que se deseja muitas vezes é prever o desempenho de um ciclone antes de sua instalação.

Modelos em escala laboratorial podem ser utilizados para estudar a influência da variação dos fatores operacionais no desempenho dos ciclones. Porém, a construção desses modelos deve seguir um *scale-down*, ou seja, deve obedecer a fatores de escala apropriados que determinam a semelhança entre o modelo e a unidade industrial. A não utilização de todos os fatores de escala pode resultar na obtenção de resultados não representativos do processo real.

O ponto de partida de um *scale-up* é o equipamento de porte industrial, chamado protótipo. A partir dele é feita uma redução da escala – o *scale-down* – para a construção de unidades menores, onde a influência das variáveis do processo podem ser mais facilmente estudadas. Os grupos adimensionais que garantem a semelhança entre o modelo e o protótipo podem ser obtidos pelo teorema dos pi de Buckingham ou, alternativamente, pela adimensionalização das equações fundamentais governantes do escoamento. A maioria dos estudos sobre ciclones não levam em conta todos os grupos adimensionais necessários para haver semelhança entre o modelo e o protótipo, de modo que os modelos disponíveis podem não atender todas as expectativas de desempenho.

Neste trabalho serão comparados os desempenhos dos tipos mais usados: Lapple, Stairmand e Swift, calculados a partir dos métodos empíricos indicados por aqueles autores, em relação a parâmetros de referência, obtidos a partir da aplicação do conjunto completo de grupos adimensionais.

2. METODOLOGIA

2.1. Perda de Pressão e Rendimento de Coleta

A perda de pressão através de um ciclone, dada pela diferença de pressão estática entre a entrada e a saída do ciclone, é proporcional à densidade do gás e ao quadrado da velocidade na sua entrada, dependendo também da concentração de partículas na suspensão gasosa, embora esta variável não seja considerada pela maioria das correlações desenvolvidas. Fatores que contribuem para a queda de pressão incluem a expansão do gás quando entra no ciclone, a formação do vórtice, o atrito nas paredes e a recuperação de energia cinética rotacional na forma de pressão na saída do ciclone. Provavelmente os três primeiros são os mais importantes, embora ainda haja controvérsias sobre a importância do atrito com as paredes.

A perda de pressão pode ser expressa em termos do número de cargas de pressão cinética na entrada, *velocity heads*, ΔH :

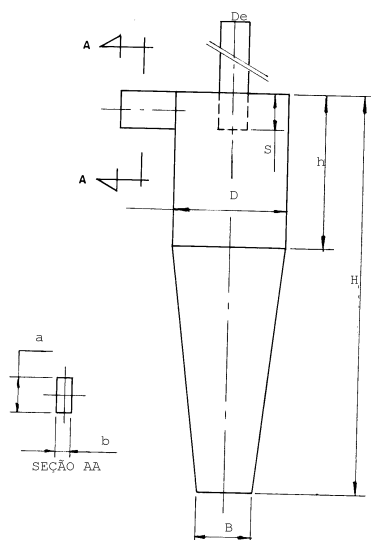
$$\Delta P = \Delta H (1/2\rho V_0^2) \quad (1)$$

onde ρ é a densidade do gás e V_0 é a velocidade do gás na entrada do ciclone. ΔH é um termo adimensional, constante para uma dada família de projeto de ciclone. Várias expressões para o cálculo deste termo foram resumidas por Leith e Jones (1997). Para efeito do cálculo da perda de pressão neste trabalho foram adotados os valores de ΔH apresentados por Leith e Jones, conforme mostra a Tabela 1. Nela também são apresentadas as proporções do ciclone em relação ao seu diâmetro que são indicadas na Fig. 1, e o valor de Q/D^2 , vazão dividida pelo quadrado do diâmetro, para o qual o desempenho do ciclone é otimizado.

Tabela 1. Parâmetros padrão para ciclones de escoamento reverso

Referência	Recomendação	D	a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D	C_o	ΔH	Q/D^2 (m/h)
Stairmand	Alta Eficiência	1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	4,0	0,38	55,1	5,4	5500
Swift	Alta Eficiência	1	0,44	0,21	0,4	0,5	1,4	3,9	0,4	64,6	9,2	4940
Lapple	Propósito Geral	1	0,5	0,25	0,5	0,63	2,0	4,0	0,25	50,4	8,0	6860
Swift	Propósito Geral	1	0,5	0,25	0,5	0,6	1,75	3,75	0,4	47,7	7,6	6680
Stern et al.		1	0,45	0,2	0,5	0,63	0,75	2,0		-	-	-
Stairmand	Alta Vazão	1	0,75	0,38	0,75	0,88	1,5	4,0	0,38	-	7,2	16500
Swift	Alta Vazão	1	0,8	0,35	0,75	0,85	1,7	3,7	0,4	-	7,0	12500

O rendimento de coleta η é definido como a fração de partículas que são coletadas pelo ciclone. Estudos experimentais mostraram que ele aumenta com o aumento do diâmetro e da densidade das partículas, com o aumento da velocidade de entrada do gás, com a diminuição do diâmetro de barril do ciclone, com o aumento do comprimento do ciclone, e com o umedecimento da parede do ciclone.



- a = Altura da entrada
- b = Largura da entrada
- B = Diâmetro de base do ciclone
- D = Diâmetro de barril do ciclone
- De = Diâmetro do tubo de saída
- h = Altura do cilindro
- H = Comprimento do Ciclone
- S = Comprimento do tubo de saída

Figura 1 - Dimensões características de um ciclone separador.

Há várias expressões na literatura para a determinação do rendimento de coleta, como as de Barth (1956), Leith e Licht (1972), Dietz (1981), Dirgo e Leith (1985), Mothes e Löffler (1985), Enliang e Yingmim (1989), bem como os métodos empíricos descritos por Stairmand (1951) e Lapple (1950). No caso do ciclone tipo Swift, para efeito deste trabalho, adotou-se a expressão de Leith e Licht (1972), relativamente simples e de precisão razoável:

$$\eta = 1 - \exp\left(-2(C_o \psi)^{1/(2n+2)}\right) \quad (5)$$

em que

$$\psi = \frac{d^2 \rho_p V_0 (n+1)}{18 \mu D} \quad (6)$$

e $n = 0.67D^{0.14}$ à temperatura de 283 K. Para outros valores de temperatura a correção é dada por :

$$\frac{1-n_1}{1-n_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{0.3} \quad (7)$$

C_o é um parâmetro adimensional, função apenas da geometria do ciclone, dado na Tabela 1. Os cálculos dos rendimentos de coleta dos ciclones tipo Stairmand e tipo Lapple, foram feitos segundo os procedimentos indicados por Stairmand (1951) e Lapple (1950), respectivamente.

2.2 Proposição dos parâmetros de semelhança para o estudo de ciclones

O projeto de modelos de ciclone para representar um sistema de porte industrial é feito pela aplicação das leis de escala, que determinam a existência de semelhança geométrica e de semelhança fluidodinâmica entre os dois sistemas.

A semelhança geométrica existe se as dimensões lineares do modelo forem relacionadas às do protótipo industrial através de um fator de escala constante, e os ângulos mantidos iguais. Modelo e protótipo apresentarão comportamento dinâmico semelhante se possuírem semelhança geométrica e se os valores correspondentes do conjunto completo de números adimensionais envolvidos no processo forem iguais. A obtenção do grupo de adimensionais pode ser feita pela aplicação do teorema dos pi de Buckingham ou, alternativamente, pela adimensionalização das equações governantes e respectivas condições de contorno, conforme os modelos de Boysan, Swithenbank e Ayers (1986) e Minier, Simonin e Gabillard (1991). Com a aplicação do teorema de Buckingham, são obtidos os grupos adimensionais que seguem:

$$Re_p = \frac{\rho_p d_p V_0}{\mu}$$

$$Fr = \frac{g d_p}{V_0^2}$$

$$\frac{\rho_g}{\rho_p}$$

$$\frac{D}{d_p}$$

$$C$$

$$\phi$$

onde ρ_p , d_p e ϕ são a densidade, diâmetro médio e esfericidade das partículas, C a concentração de sólidos e μ a viscosidade do gás na entrada do ciclone. Re_p e Fr são os números de Reynolds e de Froude. A distribuição granulométrica adimensional das partículas usadas para os testes no modelo e no protótipo também devem ser iguais. Esses mesmos grupos são obtidos ao ser feita a adimensionalização das equações governantes.

Na obtenção dos adimensionais, não foram consideradas, para efeito deste estudo, forças interparticulares, como as forças elétricas e de van der Waals, ainda pouco estudadas.

Observada a igualdade dos adimensionais correspondentes, o rendimento de coleta e a perda de pressão adimensional deverão obedecer às leis de escala.

Para exemplo, considerou-se um ciclone protótipo operando nas seguintes condições

Concentração de Sólidos na entrada, $C = 5 \text{ kg sol/kg ar}$

Temperatura na entrada, $T_1 = 640 \text{ }^\circ\text{C}$

Pressão na entrada, $P_1 = 2,0 \text{ bar}$

Viscosidade do ar, $\mu_1 = 3,932 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

Densidade do ar, $\rho_1 = 0,763 \text{ kg/m}^3$

Diâmetro médio das partículas, $dp_1 = 56,21 \text{ }\mu\text{m}$

Densidade das partículas, $\rho_{p1} = 1350 \text{ kg/m}^3$

Esfericidade das partículas, $\phi_1 = 0,90$

Para projetar os ciclones-protótipo, foram consideradas três descargas de gás, m_{ar} , a saber: 0,944; 2,125 e 3,780 kg/s; utilizando os valores dos parâmetros Q/D^2 dos ciclones Stairmand, Lapple e Swift dados na Tabela 1, foram determinados os diâmetros de três ciclones para cada descarga de gás. Dessa forma, cada ciclone protótipo opera de forma otimizada.

A partir da descarga de ar e sua densidade, e das áreas da seção de entrada de cada ciclone, determina-se a velocidade de entrada do ar em cada protótipo. As velocidades foram de 15,24; 15,28 e 14,85 m/s nos protótipos Lapple, Stairmand e Swift, respectivamente.

Os ciclones-modelo foram dimensionados a partir dos ciclones-protótipo para fatores de escala de 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5, num total de 36 ciclones modelos. O cálculo das condições operacionais desses modelos, segundo os procedimentos empíricos, é estabelecido basicamente pela manutenção do parâmetro Q/D^2 constante, e pela imposição de que os testes sejam realizados com ar à pressão atmosférica e temperatura ambiente. Com isso, para efeito de cálculo do rendimento de coleta e da perda de pressão, todos os ciclones de uma mesma família operam com a mesma velocidade.

Entretanto, para haver semelhança entre os escoamentos do protótipo e do modelo, os ciclones devem ser testados nas condições estabelecidas pela aplicação da igualdade dos grupos adimensionais envolvidos no processo. O procedimento de cálculo é exemplificado a seguir para um dos ciclones:

$$D_1 = 1,8 \text{ m (protótipo)} \quad \xrightarrow{\text{fator de escala 1:2}} \quad D_2 = 0,9 \text{ m (modelo)}$$

- Da igualdade do adimensional D/d_p , determina-se o diâmetro das partículas:

$$\left(\frac{D_1}{d_{p1}} \right) = \left(\frac{D_2}{d_{p2}} \right) \quad \longrightarrow \quad dp_2 = 28,11 \mu\text{m}$$

- Da igualdade do Número de Froude, determina-se a velocidade de entrada do gás

$$\frac{gd_{p1}}{V_{01}^2} = \frac{gd_{p2}}{V_{02}^2}$$

Para o ciclone – modelo de cada família foi determinada uma velocidade de entrada, pois a velocidade de entrada dos protótipos eram diferentes.

Lapple → $V_{02} = 10,78 \text{ m/s}$

Stairmand → $V_{02} = 10,80 \text{ m/s}$

Swift → $V_{02} = 10,50 \text{ m/s}$

- Utilizando o número de Reynolds, resulta a viscosidade cinemática do gás:

$$\frac{d_{p1}V_{01}}{v_1} = \frac{d_{p2}V_{02}}{v_2}$$

resultando em $v_{02} = 1,822 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ nos três modelos.

Com os valores de v e admitindo que os ciclone - modelo operem à pressão atmosférica é possível obter, através de uma tabela de propriedades do ar, sua temperatura e demais propriedades físicas, como a densidade. Uma vez obtido o valor da densidade do ar para o modelo, a partir do adimensional ρ/ρ_p ,

$$\left(\frac{\rho_1}{\rho_{p1}} \right) = \left(\frac{\rho_2}{\rho_{p2}} \right)$$

determina-se a densidade das partículas que devem ser utilizadas pelo modelo

$$\rho_{p2} = 1900 \text{ kg/m}^3$$

Da mesma maneira calculamos as condições de operação para os ciclones – modelo construídos de acordo com os demais fatores de escala, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Condições de operação para os ciclones - modelo .

Fator de Escala	1:2	1:3	1:4	1:5
T (K)	323,20	230,20	181,8	152,9
$\mu \times 10^{-7}$ (N.s/m ²)	195,52	148,73	121,93	105,09
$v \times 10^{-6}$ (m ² /s)	18,22	9,915	6,441	4,61
ρ (kg/m ³)	1,074	1,5	1,89	2,302
ρ_p (kg/m ³)	1900	2654	3344	4073,18

Partindo de um ciclone-protótipo, onde admite-se que η e ΔP calculados pelos métodos empíricos sejam corretos, determinam-se η e ΔP dos modelos através de dois procedimentos: pelo uso dos métodos empíricos e pela aplicação dos grupos adimensionais propostos no presente trabalho.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As Figuras 2,3 e 4 apresentam os rendimentos de coleta dos ciclones-modelo em função do fator de escala, em que as descargas de ar do protótipo foram 0,944; 2,125 e 3,780 kg/s, respectivamente. Os diâmetros dos ciclones-protótipo (escala 1:1) de cada família estão indicados nas figuras. Os pontos mostrados referem-se aos rendimentos de coleta calculados pelos métodos empíricos e pelo procedimento dos grupos adimensionais.

Dada uma descarga de gás no protótipo, o rendimento de coleta obtido pelo *scale-down* (igualdade dos grupos adimensionais) é constante para cada família de ciclone, pois

existe semelhança dinâmica entre os escoamentos dos protótipos e seus respectivos modelos em escala.

Pode ser observado nessas figuras que o rendimento de coleta calculado pelos procedimentos empíricos é maior que o rendimento de coleta obtido pela imposição do *scale-down*, no caso dos ciclones Lapple e Swift. Já no ciclone tipo Stairmand, observa-se uma tendência oposta. As diferenças entre os valores de η calculados pelos dois procedimentos são devidas ao fato dos procedimentos empíricos não levarem em consideração todas as mudanças nas condições de operação e propriedades do fluido que devem ocorrer do protótipo para o modelo.

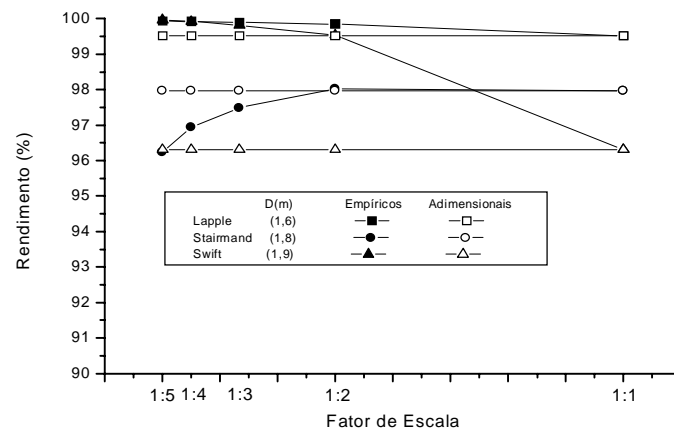


Figura 2 – Rendimento de coleta x Fator de escala.

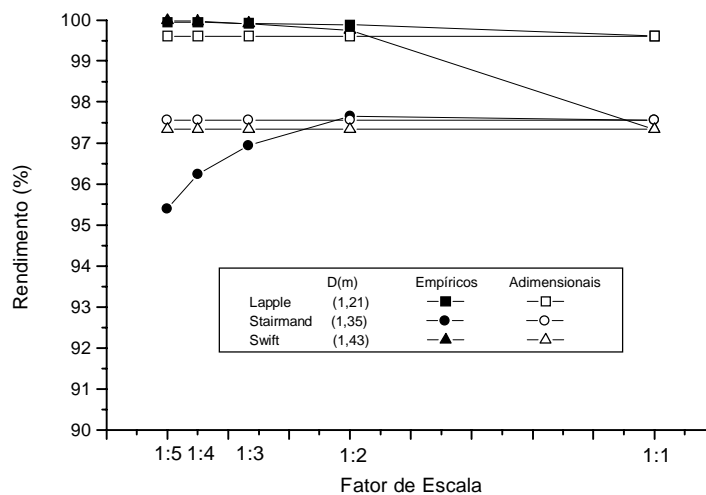


Figura 3 – Rendimento de coleta x Fator de escala.

O procedimento de Lapple foi o que produziu os resultados mais próximos dos obtidos pelo *scale-down* de referência, com desvios da ordem de 0,3 %, enquanto que no ciclone tipo Swift os desvios foram de até 4 %. Os resultados do ciclone tipo Stairmand encontram-se em uma faixa intermediária. Pode ser notado que quanto menor o fator de escala, maiores os desvios encontrados. A princípio, esses desvios parecem pequenos do ponto de vista de

engenharia, mas são significativos para as aplicações industriais de ciclones que tratam toneladas de particulados por dia.

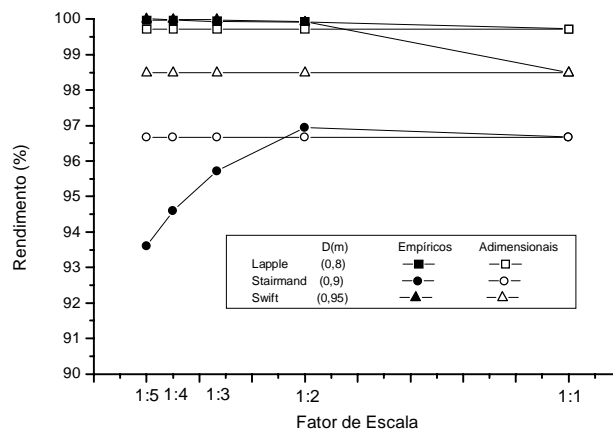


Figura 4 – Rendimento de coleta x Fator de escala. D = 1,25m.

Os resultados referentes à perda de pressão são apresentados na Fig. 5. Como o fator Q/D^2 foi mantido constante em cada família de ciclone, independentemente da descarga utilizada, os resultados puderam ser agrupados em um único gráfico, uma vez que neste caso a perda de pressão depende apenas da configuração geométrica, da densidade do fluido e da velocidade do escoamento.

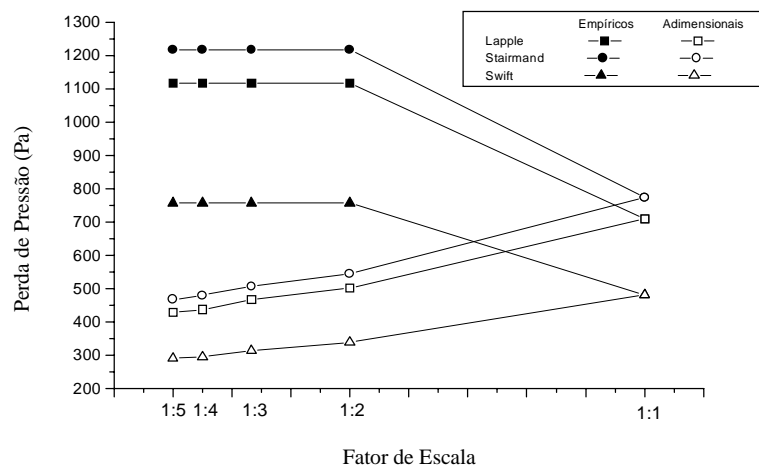


Figura 5 – Perda de pressão x fator de escala. D = 5,0m.

A perda de pressão calculada pelos procedimentos empíricos aumentou ao se aplicar o fator de escala 1:2 e após se manteve constante, pois nessa passagem a densidade do ar aumentou. Ao serem aplicados os demais fatores de escala, os procedimentos empíricos indicam que não deve haver mudanças de densidade e velocidade, daí a perda de pressão constante. Por outro lado, o procedimento de *scale-down* impõe variações tanto da densidade do ar quanto de sua velocidade, levando a uma redução da perda de pressão com a imposição de menores fatores de escala. Assim, observa-se um aumento dos desvios entre as perdas de

pressão estimadas por esses dois métodos com a diminuição do fator de escala. Os desvios tiveram a mesma ordem de grandeza nos três tipos de ciclone estudados, variando entre 120 e 165%.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi estabelecido um conjunto de números adimensionais apropriados para a realização de *scale-down* de ciclones. O método apresentado prevê mudanças nas condições de operação e propriedades do fluido que devem ser utilizadas para obtenção de semelhança dinâmica entre os escoamentos nos ciclones protótipo e modelo. Os métodos empíricos estudados não consideram essas mudanças, e os resultados obtidos diferem daqueles conseguidos pela aplicação do *scale-down*.

O rendimento de coleta estimado pelos procedimentos de Stairmand, Lapple e Swift apresentaram desvios de até 4% em relação ao *scale-down* de referência, enquanto que as perdas de pressão apresentaram desvios maiores que 100% em relação à referência. Quanto menor o fator de escala utilizado, maiores os desvios encontrados. Esses resultados sugerem cautela na aplicação dessas correlações empíricas para prever o desempenho de ciclones industriais.

REFERÊNCIAS

- Barth, W., 1956 Brennst. Waerme Kraft, 8:1, apud Dirgo e Leith (1985).
- Boysan, F., Swithenbank, J., e Ayers, W.H., 1986, Mathematical Modeling of Gas-Particle Flows in Cyclone Separator, capítulo 42 em Encyclopedia of Fluid Mechanics, vol. 4, editor: Nicholas P. Cheremisinoff, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Dietz, P. W., 1981, "Collection Efficiency of Cyclones Separatos", AIChE Journal, Vol. 27 No. 6, pp. 888-892.
- Dirgo, J. and Leith, D. 1985, "Aerosol Science and Technology", Vol. 4, pp. 401-415.
- Enliang, L., e Yingmin, W., 1989, "A New Collection Theory of Cyclones Separators", AIChE Journal, Vol.35, No.4, pp.666-669.
- Lapple, C. E., 1950, Ind. Hyg. Q., apud Dirgo e Leith (1985).
- Leith, D. e Jones, D. L., 1997, Cyclones, em Handbook of Powder Science and Technology, editado por M. E. Fayed e L. Otten, Chapman & Hall, New York,.
- Leith, D., e Licht, W., 1972, "The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors – A New Theoretical Approach", AIChE Symp. Ser., No. 126, pp. 196-206.
- Minier, J.P., Simonin, O., e Gabillard, M., 1991, Numerical Modelling of Cyclone Separators, Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Vol. 3 Clean Energy for World, ASME, Editor: E.J. Anthony, pp. 1251-1259.
- Mothes, H., e Löffler, F., 1985, "Motion and deposition of Particles in Cyclones", Ger. Chem. Eng., 8, pp. 223-233.
- Stairmand, C.J., 1949, Engineering (London), 10:409, apud Leith e Jones (1997).
- Stairmand, C.J., 1951, The Design and Performance of Cyclone Separators, Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 29, pp. 356-383.

Assessment of Scale-down Methods Applied to Cyclone Separators

Abstract *In this paper, the complete set of dimensionless numbers was established to study cyclone separators scaling. This method was used as a reference to analyze the validity of standard scaling methods such as Lapple and Stairmand parameters. The range of experimental conditions in which these procedures are applicable was assessed. Collection efficiency results obtained by these procedures are shown to have up to 4 per cent deviation from the reference results, while the pressure drop results are shown to have deviations greater than 100 per cent.*

Keywords: *Cyclones, Separator, Gas-Solid Flow, Scale-Up*