

XII-054 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE ESTIMATIVA DE NÚMERO DE REYNOLDS CRÍTICO PARA FLOCULADORES TUBULARES HELICOIDAIS

Danieli Soares de Oliveira⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo. Mestre e Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo. Professora do curso de Engenharia de Produção - Campus Cariacica - do Instituto Federal do Espírito Santo.

Edmilson Costa Teixeira⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Bahia. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Recursos Hídricos pela University of Bradford, Inglaterra. Professor do Programa de pós graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço⁽¹⁾: Rodovia Governador José Sette, S/N, Itacibá, Cariacica, ES. CEP: 29145440 - Brasil - Tel: (27) 32461600 - e-mail: danieli@ifes.edu.br

Endereço⁽²⁾: Avenida Fernando Ferrari, S/N, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29060970 - Brasil - Tel: (27) 40092675

RESUMO

O objetivo deste trabalho é comparar os modelos matemáticos comumente empregados para a estimativa do Número de Reynolds Crítico (Re_c) para Floculadores Tubulares Helicoidais (FTHs). Este parâmetro, que indica a transição entre o regime laminar e o turbulento do escoamento, é de grande importância para a escolha da metodologia de tratamento e dos produtos químicos a ser empregados. Foi verificado neste trabalho que tais modelos podem trazer resultados ambíguos e dificultar a avaliação do regime de escoamento da unidade de tratamento. Como metodologia alternativa ao uso de tais modelos, sugere-se o uso de modelagem fluidodinâmica computacional para obtenção de características intrínsecas do escoamento.

PALAVRAS-CHAVE: Número de Reynolds Crítico, Floculadores Tubulares Helicoidais, Eficiência de Remoção de turbidez, Número de Reynolds.

INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de obtenção de tecnologias mais eficientes e menos onerosas para a clarificação de águas e efluentes, diversos pesquisadores têm avaliado métodos alternativos para esta finalidade. O Floculador Tubular Helicoidal (FTH), também conhecido por Reator Gerador de Flocos (RGF), tem sido estudado em centros de pesquisa nacionais e internacionais, visando a formação de flocos para posterior separação sólido-líquido por flotação ou decantação (CARISSIMI E RUBIO, 2005; SARTORI, 2006; CARISSIMI E RUBIO, 2007; OLIVEIRA, 2008; SILVEIRA et al., 2009; TSE et al., 2011; VAEZI et al., 2011).

Nesses trabalhos é possível verificar o FTH funcionando em altos e baixos valores de Números de Reynolds (Re), indicando regimes de escoamento turbulentos e laminares, respectivamente. Em geral, para altos valores de Números de Reynolds são utilizados, além do coagulante e do alcalinizante, polímeros floculantes como auxiliares de floculação, como visto nos trabalhos de Carissimi e Rubio (2005) e Carissimi e Rubio (2007).

A utilização de polímeros auxiliares de floculação se deve à facilidade de desestruturação dos flocos formados com a utilização de sais de alumínio e ferro, que não resistem a significativas tensões de cisalhamento. No caso da utilização de polímeros, há a formação de pontes entre as partículas e a cadeia do polímero, tornando os flocos mais resistentes. Destaca-se que em FTH a massa líquida é submetida a significativas tensões de cisalhamento devido ao elevado gradiente de velocidade geralmente verificado nessas unidades.

A característica curva verificada nos FTHs promove uma laminarização do escoamento, no qual a característica laminar do fluxo pode ser mantida sob Números de Reynolds maiores do que os verificados em tubos retos. Experimentalmente este efeito foi demonstrado no trabalho de Sreenivasan e Strykowski (1983), por meio da introdução de um corante na seção de entrada de um circuito hidráulico formado por um tubo

retilíneo seguido de um tubo helicoidalmente enrolado; com $Re = 4000$ foi possível verificar a dispersão do corante na seção retilínea do tubo, enquanto que no prolongamento helicoidal do tubo verifica-se características laminares no escoamento, com a demarcação das linhas de fluxo que compõem o fluxo.

A definição dos limites entre o escoamento laminar e o escoamento turbulento é dado pelo parâmetro número de Reynolds crítico (Re_c), que corresponde ao menor número de Reynolds no qual é possível verificar a presença de elementos turbulentos na região avaliada.

Diversos autores propuseram critérios para a estimativa do número de Reynolds crítico para tubos enrolados helicoidalmente, como visto no Quadro 1. Estes autores afirmam que o fluxo secundário em um tubo curvo é a razão potencial de se estabilizar o fluxo do fluido como laminar, resultando em um maior número de Reynolds crítico. Tal conclusão justifica os resultados de trabalhos que encontraram valores de Re_c maiores para tubos curvados do que para tubos retilíneos. As correlações para Re_c foram obtidas para condições específicas de geometria (geralmente em função da curvatura).

<i>Autor</i>	<i>Função de Regressão</i>	<i>Condição de Obtenção</i>
Ito (1959)	$Re_{\text{crítico}} = 2 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{0,32} \cdot 10^4$	$15 < c/a < 860$
Kubair e Varrier (1962)	$Re_{\text{crítico}} = \frac{12730}{\left(\frac{a}{c}\right)^{0,2}}$	$0,0005 < a/c < 0,103$
Schmidt (1967)	$Re_{\text{crítico}} = 2300 \left(1 + 8,6 \left(\frac{a}{c}\right)^{0,45}\right)$	$c/a < 200$
Srinivasan <i>et al.</i> (1968)	$Re_{\text{crítico}} = 2100 \left(1 + 12 \left(\frac{a}{c}\right)^{0,5}\right)$	$0,0417 < a/c < 0,167$
Mishra e Gupta (1979)	$Re_{\text{crítico}} = 20.000 \left[\frac{\frac{a}{c}}{\left(1 + \left(\frac{b}{2\pi c}\right)^2\right)} \right]^{0,32}$	$0,003 < a/c < 0,15$
Cioncolini e Santini (2006) – Modelo 1	$Re_{\text{crítico}} = 30.000 \left(\frac{c}{a}\right)^{-0,47}$	$\frac{c}{a} \leq 24$
Cioncolini e Santini (2006) – Modelo 2	$Re_{\text{crítico}} = 120.000 \left(\frac{c}{a}\right)^{-0,57}$	$30 \leq \frac{c}{a} \leq 110$
	$Re_{\text{crítico}} = 2.300 \left[1 + 210 \left(\frac{c}{a}\right)^{-1,12}\right]$	$\frac{c}{a} \geq 150$

Quadro 1 – Números de Reynolds crítico obtidos por diversos autores

Dada a quantidade de modelos e suas diferentes faixas de aplicação, é proposto neste trabalho uma avaliação dos principais modelos empíricos disponíveis na literatura para a definição do número de Reynolds crítico. Esta avaliação permitirá uma melhor avaliação dos agentes químicos a serem utilizados no processo de clarificação utilizando FTHs.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do Número de Reynolds Crítico foram consideradas 7 configurações de Floculadores Tubulares Helicoidais. Os parâmetros de estudo foram: diâmetro do tubo (a) e diâmetro do enrolamento (c), e distância entre voltas (b). Tais características geométricas são mostradas na Figura 1.

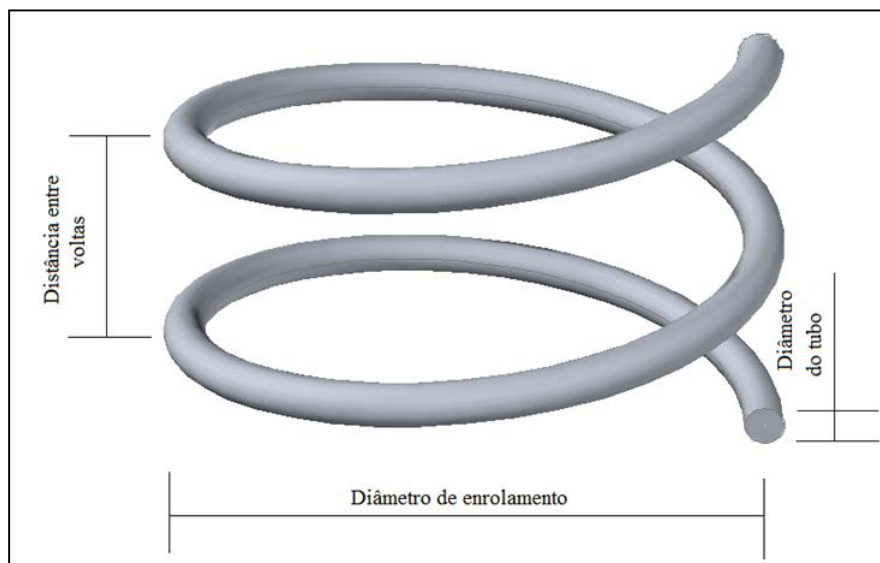


Figura 1 - Representação esquemática de um Floculador Tubular Helicoidal com a descrição de suas principais características geométricas

As características geométricas avaliadas foram definidas com base nos valores empregados no trabalho experimental de Silva (2007) e Oliveira (2008). Tais características são apresentadas na Tabela 1. Para avaliação do regime de escoamento foram consideradas as vazões máximas de 2L/min para as configurações 1 e 2, 4L/min para a configuração 3 e 5L/min para as configurações 4, 5, 6 e 7 - valores também empregados nos trabalhos de Silva (2007) e Oliveira (2008).

Tabela 1 - Características geométricas avaliadas neste trabalho.

<i>Configuração</i>	<i>Diâmetro do tubo (pol.)</i>	<i>Diâmetro de enrolamento (cm)</i>	<i>Passo (cm)</i>	<i>c/a - razão entre o diâmetro de enrolamento e o diâmetro do tubo</i>
1	3/8"	10	0,22	11,9
2	1/2"	10	0,27	9,2
3	5/8"	10	0,32	7,6
4	3/8"	5	0,22	6,7
5	3/8"	30	0,28	33,3
6	1/2"	5	0,33	5,6
7	1/2"	30	0,80	25,3

RESULTADOS

Para a avaliação do regime de escoamento em FTHs foi realizada inicialmente uma análise dos principais modelos empíricos disponíveis na literatura para a definição do número de Reynolds crítico, apresentados no Quadro 1. Destaca-se que tais modelos possuem faixas de trabalho específicas, que impedem o seu uso indiscriminado.

Desta forma, verificou-se que as faixas de trabalho dos modelos empíricos avaliados divergem da faixa de trabalho desta pesquisa. Para explicitar a relação entre a faixa de trabalho dos reatores avaliados e os reatores utilizados na concepção dos modelos empíricos foi construída a Figura 2, produzida em função da razão entre o diâmetro de enrolamento e o diâmetro do tubo (c/a), visto que este foi o parâmetro geométrico utilizado para definição das faixas de trabalho dos modelos empíricos.

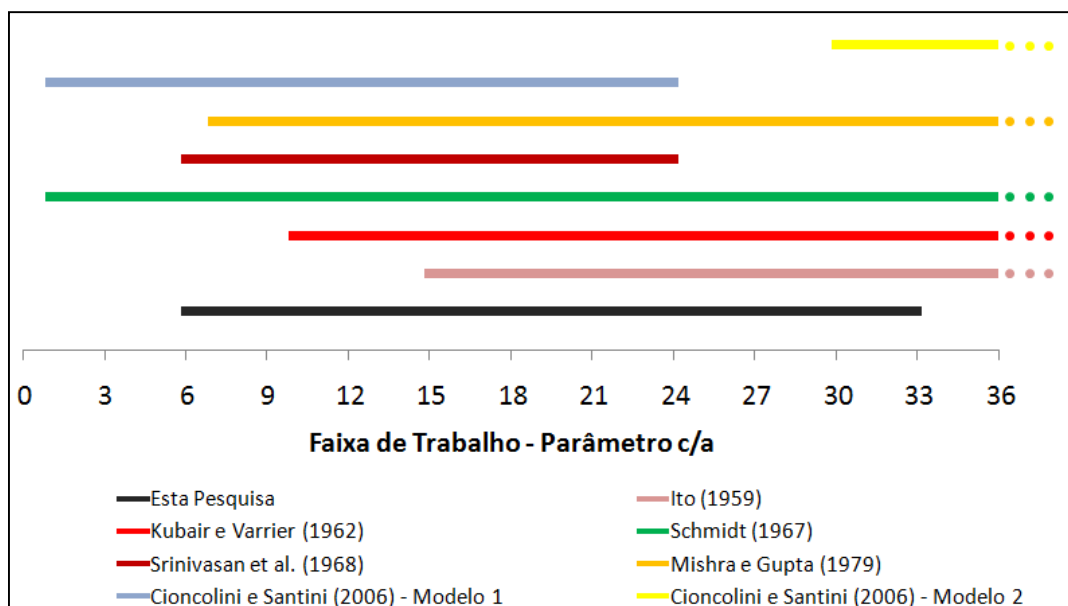


Figura 2 - Faixas de trabalho para o parâmetro c/a nesta pesquisa e nos trabalhos que apresentam modelos de estimativa do número de Reynolds crítico para tubos enrolados helicoidalmente.

Dada à faixa de trabalho das configurações avaliadas nesta pesquisa é possível verificar que, para todas as configurações, pelo menos dois modelos empíricos de estimativa de Re_c podem ser utilizados; como exemplo, uma configuração cujo parâmetro c/a é igual a 9 pode ser avaliada pelos modelos de Schmidt (1967), Srinivasan *et al.* (1968), Mishra e Gupta (1979) e Cioncolini e Santini (2006).

A comparação entre os Re apurados para cada configuração e os valores de Re_c obtidos por meio dos modelos empíricos apresentados na Tabela 2 (respeitando as respectivas faixas de trabalho) permitiu constatar ambiguidades em algumas das configurações; isto é, modelos distintos indicaram regimes de escoamento distintos para uma mesma configuração de FTH. Como exemplo, destaca-se a configuração com $d = 3/8''$ e $D = 30$ cm (configuração 5), para a qual 3 modelos indicaram que o número de Reynolds verificado para a maior vazão está acima do número de Reynolds crítico (indicando fluxo turbulento); por outro lado, 2 modelos indicaram que o número de Reynolds verificado para a maior vazão está abaixo do número de Reynolds crítico (indicando fluxo laminar).

Tabela 2 - Regimes de escoamento obtidos por meio dos modelos empíricos de estimativa do número de Reynolds crítico para tubos enrolados helicoidalmente

Config.	Ito (1959)	Kubair e Varrier (1962)	Schmidt (1967)	Srinivasa n et al. (1968)	Mishra e Gupta (1979)	Cioncolini e Santini (2006) – Modelo 01	Cioncolini e Santini (2006) – Modelo 02
1	NA	LAM	LAM	LAM	LAM	LAM	NA
2	NA	NA	LAM	LAM	LAM	LAM	NA
3	NA	NA	LAM	LAM	LAM	LAM	NA
4	NA	NA	TURB	TURB	TURB	LAM	NA
5	TURB	LAM	TURB	NA	TURB	NA	LAM
6	NA	NA	LAM	NA	NA	LAM	NA
7	TURB	LAM	TURB	NA	TURB	NA	NA

Legenda: NA – Não se aplica (fora da faixa de trabalho); LAM – Fluxo laminar; TURB – Fluxo turbulento.

Este resultado mostra a fragilidade do uso exclusivo de modelos matemáticos empíricos para a definição do regime de escoamento em FTHs. Com base nesse resultado, sugere-se cautela no uso de tais modelos. Como metodologia alternativa, recomenda-se o uso de modelagem fluidodinâmica computacional para a avaliação do regime de escoamento em tubos helicoidalmente enrolados. Esta ferramenta pode auxiliar na definição do regime de escoamento sem a necessidade de construção de protótipos/modelos reduzidos e sem as dificuldades inerentes aos procedimentos experimentais.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Os modelos comumente utilizados para estimar o Número de Reynolds crítico para Floculadores Tubulares Helicoidais podem trazer resultados ambíguos e dificultar a avaliação do regime de escoamento da unidade de tratamento. Com isso, recomenda-se cautela no uso de tais modelos. Como metodologia alternativa ao uso de tais modelos, sugere-se o uso de modelagem fluidodinâmica computacional para obtenção de características intrínsecas do escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARISSIMI, E.; J. RUBIO. Characterization of the high kinetic energy dissipation of the Flocs Generator Reactor (FGR). *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 85: p. 41–49, 2007.
2. CARISSIMI, E.; J. RUBIO. Reator Gerador de Flocos e Processo para tratamento de águas e efluentes. I-I. N. d. P. Industrial. Brasil. nº INPI 0406106-3, 2013.
3. Cioncolini, A. and Santini, L. (2006a) An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science* 30 367 - 380.
4. Cioncolini, A. and Santini, L. (2006b) On the laminar to turbulent flow transition in diabatic helically coiled pipe flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 30, 653–661.
5. Ito, H. (1959) Friction factors for turbulent flow in curved pipes. *Journal of basic engineering*, 123 - 134.
6. Kubair, V. and Varrier, C.B.S. (1962) Pressure drop for liquid flow in helical coils. *Trans Indian Inst. Chem. Eng.* 14.
7. Mishra, P. and Gupta, S.N. (1979) Momentum Transfer in curved pipes. 1. Newtonian Fluids. *Ind. Eng. Chem. Des. Dev.* 18(1), 130-137.
8. Oliveira, D.S. (2014) Proposição de modelo de previsão de desempenho de unidades de floculação tubulares helicoidais., Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
9. Oliveira, D.S.d. (2008) Avaliação da Eficiência de Remoção de Turbidez em função de variações no comprimento de Floculadores Tubulares Helicoidais, UFES, Vitória.
10. SARTORI, M. Caracterização Hidrodinâmica de Floculadores Tubulares Helicoidais por Meio de Simulação Numérica Tridimensional. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
11. Schmidt, E.F. (1967) Heat transfer and pressure loss in pipe coils. *Chem. Ing. Tech* 39, 781-789.
12. Silva, R.C.d. (2007) Avaliação da Influência da geometria e Dinâmica do escoamento de Floculadores Tubulares Helicoidais na Redução de Turbidez, utilizando Modelagem Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
13. SILVEIRA, A. N. D.; R. SILVA; J. RUBIO. Treatment of acid mine Drainage (AMD) in South Brazil: comparative active processes and water reuse. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 93: p. 103 – 109, 2009.
14. SREENIVASAN, K. R.; P. J. STRYKOWSKI. Stabilization Effects in flow through helically coiled pipes. *Experiments in Fluids*. Vol.: p. 31-36, 1983.
15. Srinivasan, P.S., Nandapurkar, S.S. and Holland, F.A. (1968) A pressure drop and heat transfer in coils. *Chemical Engineering* 113.
16. TSE, I. C.; K. SWETLAND; M. L. WEBER-SHIRK; L. W. LION. Method for quantitative analysis of flocculation performance. *Water Res.* Vol. 45(10): p. 3075-3084, 2011.
17. VAEZI, G. F.; R. S. SANDERS; J. H. MASLIYAH. Flocculation kinetics and aggregate structure of kaolinite mixtures in laminar tube flow. *J Colloid Interface Sci.* Vol. 355(1): p. 96-105, 2011.