

Helically Coiled Tube Flocculators for Water Clarification: Evaluation of Winding Diameter in Turbidity Removal Efficiency

Utilização de Floculadores Tubulares Helicoidais para Clarificação de Águas: Avaliação do Diâmetro de Enrolamento na Eficiência de Remoção de Turbidez

Article Info:

Article history: Received 2022-09-07 / Accepted 2022-09-15 / Available online 2022-09-15

doi: 10.18540/jcecv18iss6pp14683-01e

Danieli Soares de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1434-4950>

Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes *campus* Cariacica, Brasil

E-mail: danieli@ifes.edu.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência de remoção de turbidez de um sistema de clarificação alternativo composto por um floculador tubular helicoidal (FTH) acoplado a um sistema de decantação, de forma a comparar a mudança na eficiência do processo de acordo com mudanças geométricas da unidade, em especial o diâmetro de enrolamento (D). O uso de FTHs tem chamado a atenção da comunidade científica devido à alta eficiência de floculação e do reduzido tempo de residência, em comparação com outras unidades mais comumente utilizadas para esta finalidade. Testes experimentais físicos foram realizados com dois FTHs com diferentes diâmetros de enrolamento (5 e 30cm) e duas vazões de alimentação (1 e 2L/min) e os resultados indicam que as mudanças obtidas no perfil de velocidade com a alteração do diâmetro de enrolamento da unidade promovem alterações na interação entre as partículas previamente desestabilizadas e, com isso, são verificadas mudanças na eficiência de remoção de turbidez, com variações na ordem de 10% neste valor apenas com a alteração da geometria helicoidal da unidade. As maiores eficiências de remoção de turbidez foram obtidas para o maior diâmetro de enrolamento, onde gradientes de velocidade mais brandos são verificados. Os altos valores de gradiente de velocidade verificados na unidade com menor diâmetro de enrolamento podem propiciar a quebra dos flocos previamente formados, reduzindo a eficiência do processo de tratamento. Este resultado indica que o diâmetro de enrolamento influencia significativamente na eficiência de sistema de clarificação de águas compostos por FTHs e este parâmetro deve ser avaliado com cautela para garantir uma eficiência satisfatória do processo.

Palavras-chave: Floculadores tubulares helicoidais. Diâmetro de enrolamento. Eficiência de remoção de turbidez.

Abstract

This paper aims to evaluate the turbidity removal efficiency of an alternative clarification system composed of a helically coiled tube flocculator (HCTF) coupled to a decantation system, to compare the change in process efficiency according to geometric changes of the unit, especially the winding diameter (D). The use of HCTFs has drawn the attention of the scientific community due to its high efficiency and its reduced detention time compared to other units commonly used for this purpose. Physical experimental tests were performed with two HCTFs with different winding diameters (5 and 30cm) and two flow rates (1 and 2L/min); results indicate that the changes obtained in the velocity profile with the change in the winding diameter of the unit promote changes in interaction between previously destabilized particles and thus changes in turbidity removal efficiency, with variations around 10%. The highest efficiencies of turbidity removal were obtained for the highest

winding diameter, where lower velocity gradients are verified. High velocity gradient values verified in the unit with lower winding diameter may promote the breaking of previously formed flocs, reducing the efficiency of the treatment process. This result indicates that the winding diameter significantly influences the efficiency of water clarification system when using HCTFs and this parameter should be cautiously evaluated to ensure satisfactory process efficiency.

Keywords: Helically coiled tube flocculators. Winding diameter. Turbidity removal efficiency.

1. Introdução

A clarificação de água é uma etapa importante no tratamento da água convencional e é comumente realizada em três etapas: em primeiro lugar, os agentes químicos ou naturais são adicionados ao fluxo de massa por intensa agitação para desestabilizar as partículas (coagulação); em seguida, a agitação é reduzida para permitir a interação entre as partículas desestabilizadas para posterior formação de flocos; finalmente, uma separação líquido-sólido é realizada por sedimentação ou flotação, visando a separação da parte sólida da água em tratamento. Em especial, as etapas de coagulação e floculação visam aumentar o tamanho das partículas presentes na massa líquida, aumentando a eficiência de remoção de partículas muito pequenas, coloides e micro poluentes (Jarvis, Jefferson, Gregory, & Parsons, 2005).

Uma unidade inovadora e compacta sugerida por vários autores para promover a floculação é o floculador tubular helicoidal (FTH). Este floculador promove uma formação de flocos de forma eficiente, com alta eficiência de remoção de turbidez e baixos tempos de processo, tendo como vantagem ainda a não necessidade de elementos mecanizados para seu funcionamento, visto que o próprio fluxo da água garante a agitação necessária para os processos de clarificação. Outra vantagem deste tipo de reator refere-se ao baixo custo de instalação/ manutenção e a pequena área requerida para sua operação (Al-Hashimi & Ashjyan, 1989; Carissimi & Rubio, 2005, 2007; Elmaleh & Jabbouri, 1991; G., Sanders, & Masliyah, 2011; Gregory, 1982; Grohmann, Reiter, & Wiesmann, 1981; Hameed, Muhammed, & Sapre, 1995; Oliveira & Teixeira, 2017a, 2017b, 2018; Sartori, 2006; Silveira, Silva, & Rubio, 2009; Thiruvengkatachari, Ngo, Hagare, Vigneswaran, & Aim, 2002; Vigneswaran & Setiadi, 1986).

Apesar do grande conjunto de trabalhos já publicados em FTHs, ainda existe uma lacuna acerca da variação de eficiência de processo neste tipo de sistema com a variação da curvatura, representada neste trabalho pelo diâmetro de enrolamento da unidade. Este parâmetro tem grande relevância porque influencia na agitação da massa líquida dentro do FTH, podendo interferir na eficiência do processo de tratamento. Inclusive, o gradiente médio de velocidade, principal parâmetro de projeto de floculadores, é diretamente influenciado pela curvatura da unidade, de forma que o diâmetro de enrolamento se torna um parâmetro geométrico de grande relevância no projeto racional deste tipo de sistema de clarificação. Portanto, este artigo apresenta resultados experimentais para o processo de floculação (indiretamente medido como eficiência de remoção de turbidez) utilizando um par de FTHs, nos quais a única diferença geométrica é o diâmetro de enrolamento.

2. Material e Métodos

O floculador tubular helicoidal utilizado nesta pesquisa consistiu em uma mangueira de PVC transparente e flexível, enrolada em um tubo rígido de PVC. A Figura 1 apresenta um esquema representativo de um FTH, com indicação das características geométricas diâmetro do reator (d) e diâmetro de enrolamento (D).

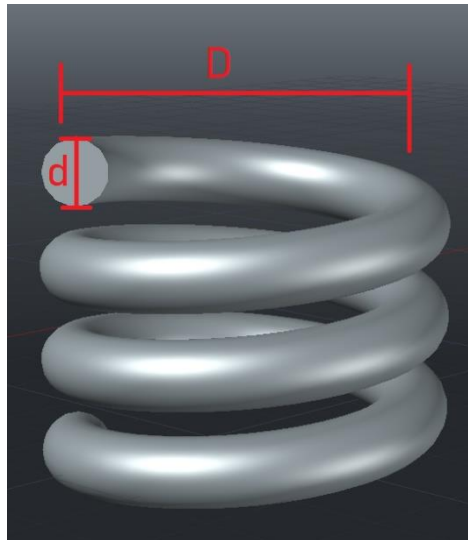


Figura 1 - Esquema representativo de um flocculador tubular helicoidal. Fonte: Própria autoria.

O aparato experimental utilizado neste trabalho é mostrado na Figura 2a. A água sintética é armazenada em um reservatório e é produzida por meio da mistura de água e argila, de forma que a turbidez média do fluido seja de 50 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) (parte 1). Em seguida, o fluxo passa por um medidor de fluxo (rotâmetro) e os seguintes produtos químicos foram adicionados à massa fluida: sulfato de alumínio como coagulante químico, e hidróxido de sódio como agente alcalino (parte 2). O fluido é então encaminhado para o FTH (parte 3) e, finalmente, para um sistema de decantação (alocado na parte posterior do circuito hidráulico) para coleta de amostras e análise da eficiência de remoção de turbidez. A eficiência de remoção de turbidez foi obtida por meio da análise da água antes e depois da passagem do sistema de clarificação proposto neste trabalho. Os valores de turbidez inicial e turbidez remanescente foram obtidos com o uso de um turbidímetro - Marca Hach, modelo 2100p, com resolução de 0,01UT, por meio de medições no reservatório de água sintética e na saída do decantador, respectivamente. O cálculo da eficiência de remoção de turbidez é dado pela Equação (1):

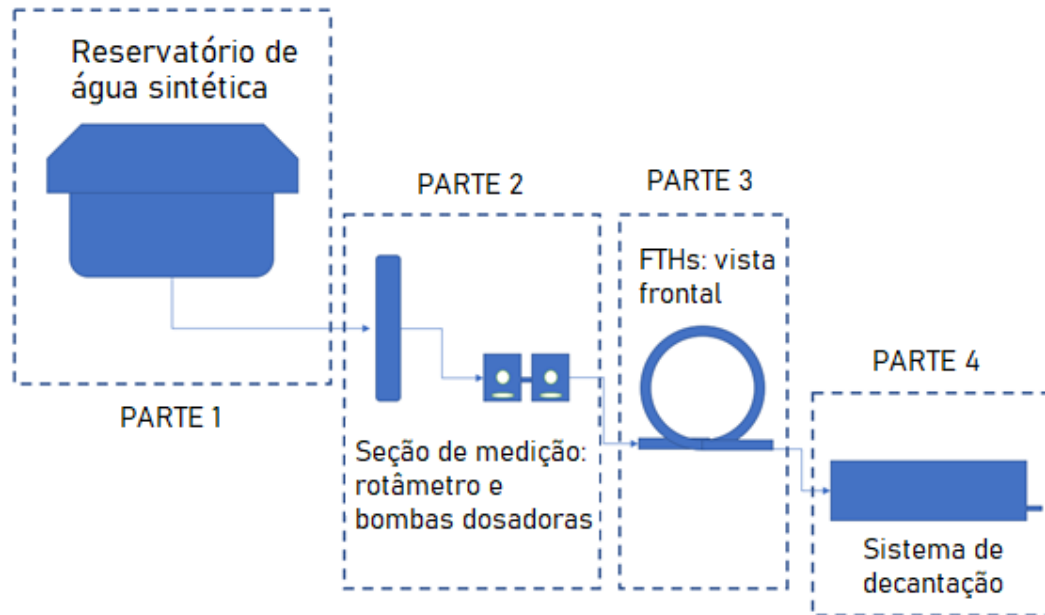
$$Eficiência (\%) = 1 - \frac{turbidez\ remanescente}{turbidez\ inicial} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Turbidez remanescente é a turbidez após a passagem pelo sistema de clarificação;

Turbidez inicial é a turbidez medida na entrada do sistema.

Os FTHs utilizados neste trabalho possuem diâmetros de tubos iguais a 1/2" (0,0127 m) e comprimentos iguais a 11,84 m - valores indicados no trabalho experimental de Oliveira e Teixeira (2017a). A curvatura do tubo helicoidal foi representada neste trabalho pelo parâmetro diâmetro de enrolamento, uma vez que o diâmetro do reator e o comprimento do tubo foram mantidos constantes em todos os testes. Foram testados dois valores diferentes de curvatura: (1) diâmetro de enrolamento igual a 0,05 m e (2) diâmetro de enrolamento igual a 0,30 m. Uma ilustração esquemática dessas unidades é mostrada na Figura 2b. Dois valores de vazão de alimentação foram testados: (1) $Q_1 = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1 L/min) e (2) $Q_2 = 3,33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (2L/min). Detalhes do sistema de decantação podem ser encontrados em Oliveira e Teixeira (2017a). Já o gradiente de velocidade foi calculado pelo método apresentado em Camp (1955).



(a)



(b)

Figura 2 - (a) esquema representativo do circuito hidráulico; (b) esquema representativo dos FTHs testados: o primeiro com $D = 0,05$ m e o segundo com $D = 0,30$ m. Fonte: própria autoria.

3. Resultados e Discussão

Os resultados experimentais obtidos para os dois valores de curvatura são mostrados na Figura 3. As variações da vazão de alimentação não resultaram em diferenças significativas na eficiência de remoção da turbidez (inferiores a 2%). No entanto, as variações devido à curvatura (diâmetro de enrolamento) foram significativas, alterando a eficiência do processo em mais de 10%.

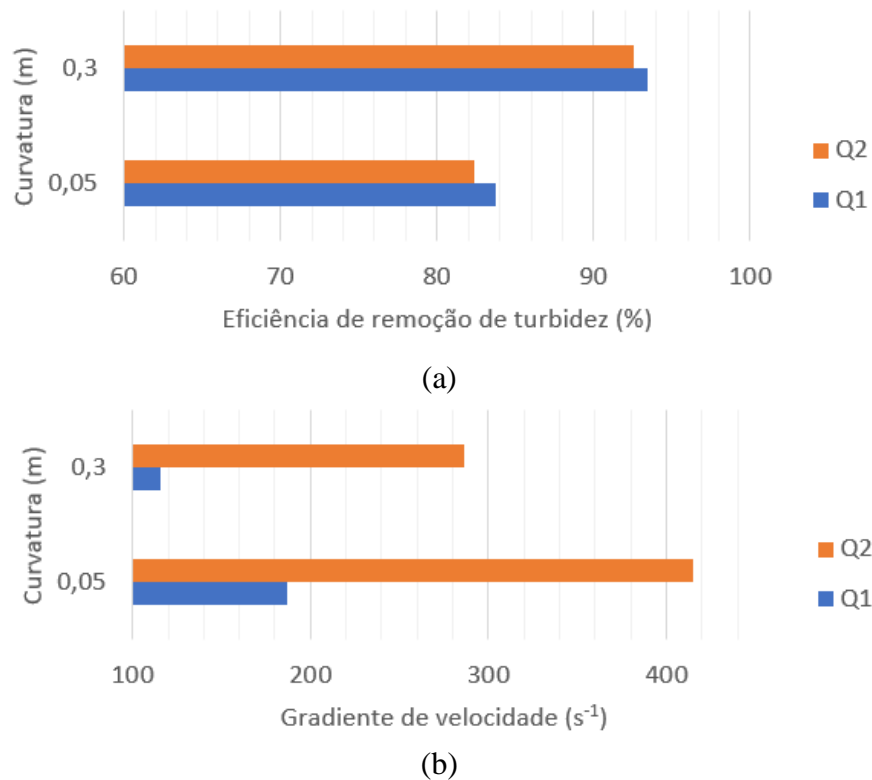


Figura 3 - (a) Eficiência de remoção de turbidez para curvatura igual a 0,30 m e 0,05 m; (b) Gradientes de velocidade para as unidades testadas. Fonte: própria autoria.

O resultado apresentado na Figura 3 indica que o aumento da curvatura (verificado na geometria onde $D = 0,05$ m) promove gradientes de velocidade mais elevados dentro da unidade (devido a uma maior perda de carga da unidade). Isso pode causar fragmentação de flocos previamente formados e, conseqüentemente, pode causar uma redução da eficiência de remoção da turbidez. Os gradientes de velocidade observados na unidade com diâmetro de enrolamento igual a 0,30m foram mais baixos, indicando que a agitação promovida na massa de fluido permitiu a interação entre partículas desestabilizadas pelo coagulante, sem promover a desintegração de flocos previamente formados. Dessa forma, a compreensão das características hidráulicas e geométricas dessas unidades de floculação e seus impactos no comportamento do escoamento são de grande importância para o projeto racional de tais unidades.

As variações de vazão de alimentação propostas nesta pesquisa não trouxeram variações significativas na eficiência de remoção de turbidez (variações inferiores a 2%), indicando que a variação proposta neste trabalho não influenciou de forma significativa o processo. No entanto, é importante destacar que os melhores resultados foram verificados para as menores vazões, indicando que altos valores de agitação na massa líquida propiciam a desestruturação dos flocos previamente formados, reduzindo a eficiência de remoção de turbidez.

Outro resultado importante verificado por intermédio da Figura 3 refere-se as variações na configuração dos reatores, que podem resultar em variações significativas em sua eficiência. Neste trabalho, o simples fato de ter enrolado a unidade de forma diferenciada resultou em variações de eficiência superiores a 10%, o que é bastante significativo para o processo de floculação. Destaca-se que, para promover essa variação, não foram necessários insumos a mais, visto que os produtos químicos utilizados e a tubulação que compunha o FTH eram exatamente as mesmas, bem como a água sintética e as vazões de alimentação. Em muitos casos, variações de eficiência dessa magnitude só podem ser alcançadas com a adição de mais produtos químicos ou mudanças na vazão de alimentação das unidades, o que poderia acarretar aumento no custo do tratamento da água, além dos malefícios ao meio ambiente e à saúde humana que podem ser verificados com o aumento no consumo de produtos químicos auxiliares do processo de tratamento.

4. Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam a importância do parâmetro curvatura (representado neste trabalho pelo diâmetro de enrolamento da unidade) na eficiência de remoção de turbidez em flocculadores tubulares helicoidais. Foram verificadas variações superiores a 10% com a mudança do diâmetro de enrolamento, sendo os melhores resultados verificados para o maior diâmetro de enrolamento. Pequenas variações foram verificadas com a variação da vazão de alimentação da unidade (inferiores a 2%), indicando que este parâmetro não influencia de forma significativa o processo, sendo os melhores resultados verificados para as menores vazões. Ambos os resultados indicam que cenários com maiores valores de gradiente de velocidade propiciam a quebra dos flocos previamente formados, reduzindo a eficiência de remoção de turbidez. Este resultado indica que o diâmetro de enrolamento influencia significativamente na eficiência de sistema de clarificação de águas compostos por FTHs e este parâmetro deve ser avaliado com cautela para garantir uma eficiência satisfatória do processo - estes resultados evidenciam a importância da correta escolha do diâmetro de enrolamento para o projeto racional de FTHs e a poderosa ferramenta que esta unidade de flocação pode ser no processo de clarificação de águas e efluentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio institucional do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes).

Referências

- Al-Hashimi, M. A. I., & Ashjyan, A. S. K. (1989). Effectiveness of helical pipes in the flocculation process of water *Filtration and Separation Journal* 26(6), 422-429.
- Camp, T. R. (1955). Flocculation and flocculation basins. *ASCE Transactions*, 120, 1-16.
- Carissimi, E., & Rubio, J. (2005). The flocs generator reactor – FGR: a new basis for flocculation and solid–liquid separation. *International Journal of Mineral Processing*, 75, 237 – 247.
- Carissimi, E., & Rubio, J. (2007). Characterization of the high kinetic energy dissipation of the Flocs Generator Reactor (FGR). *International Journal of Mineral Processing*, 85, 41–49.
- Elmaleh, S., & Jabbouri, A. (1991). Flocculation energy requirement. *Water Research*, 25(8), 939-943.
- G., F. V., Sanders, R. S., & Masliyah, J. H. (2011). Flocculation kinetics and aggregate structure of kaolinite mixtures in laminar tube flow. *J Colloid Interface Sci*, 355, 96-105.
- Gregory, J. (1982). Particle interactions in flowing suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 17(1), 149–160.
- Grohmann, A., Reiter, M., & Wiesmann, U. (1981). New flocculation units with high efficiency. *Water Science and Technology*, 13(11/12), 567-573.
- Hameed, M. S., Muhammed, T. J., & Sapre, A. A. (1995). Improved technique for river water flocculation. *Filtration & Separation*, 32(2), 63–68.
- Jarvis, P., Jefferson, B., Gregory, J., & Parsons, S. A. (2005). A review of floc strength and breakage. *Water Research*, 39, 3121–3137.
- Oliveira, D. S., & Teixeira, E. C. (2017a). Experimental evaluation of helically coiled tube flocculators for turbidity removal in drinking water treatment units. *Water SA*, 43(3), 378-386. doi:10.4314/wsa.v43i3.02
- Oliveira, D. S., & Teixeira, E. C. (2017b). Hydrodynamic characterization and flocculation process in helically coiled tube flocculators: an evaluation through streamlines. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14. doi:10.1007/s13762-017-1341-z
- Oliveira, D. S., & Teixeira, E. C. (2018). Swirl number in helically coiled tube flocculators: theoretical, experimental, and CFD modeling analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*. doi:10.1007/s13762-018-2027-x

- Sartori, M. (2006). *Caracterização Hidrodinâmica de Flocladores Tubulares Helicoidais por Meio de Simulação Numérica Tridimensional*. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Silveira, A. N. d., Silva, R., & Rubio, J. (2009). Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil: comparative active processes and water reuse. *International Journal of Mineral Processing*, 93, 103 – 109.
- Thiruvengkatachari, R., Ngo, H. H., Hagare, P., Vigneswaran, S., & Aim, R. B. (2002). Flocculation-cross-flow microfiltration hybrid system for natural organic matter (NOM) removal using hematite as a flocculent. *Desalination*, 147(1), 83-88.
- Vigneswaran, S., & Setiadi, T. (1986). Flocculation study on spiral flocculator. *Water, Air, and Soil Pollution*, 29(2), 165-188