

II-206 - AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO FLUIDO NA EFICIÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE ÓLEO EMULSIONADO DE EFLUENTES ATRAVÉS DE UM COALESCEDOR DE LEITO DE RESINAS DE TROCAS CATIÔNICAS

Albérico Ricardo Passos da Motta⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Engenheiro Sanitarista pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestrado em Engenharia Ambiental pela Newcastle University (Reino Unido). Doutorado em Engenharia Industrial pela UFBA. Engenheiro de Meio Ambiente da Petrobras.

Cristiano Piacksek Borges⁽²⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestrado em Engenharia Química pela UFRJ. Doutorado em Engenharia Química pela UFRJ. Professor do Programa de Engenharia Química do Instituto Alberto Luis Coimbra (COPPE) da UFRJ.

Karla Patricia de Oliveira Esquerre⁽³⁾

Engenheira Química – Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestrado e Doutorado em Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Pós-doutorado em Engenharia Sócio-Ambiental – Hokkaido University (Hokudai, Japão). Professora do Departamento de Engenharia Química e do Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (EP/UFBA).

Asher Kiperstok⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pelo TECHNION- Instituto Tecnológico de Israel, Mestrado e doutorado em Engenharia Química/ Tecnologias Ambientais pela Universidade de Manchester, Reino Unido, Coordenador do TECLIM, Rede de Tecnologias Limpas, Programa de Engenharia Industrial, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Endereço⁽¹⁾: Av. Tancredo Neves, 1368, 8º andar, sala 802 – Caminho das Árvores - Salvador - BA - CEP: 41820-021 - Brasil - Tel: (71) 3797-5325 - e-mail: arpmotta@yahoo.com.br

RESUMO

O processo de tratamento com coalescedor de leito consiste em se induzir a separação das gotas de óleo emulsionadas em água, pela passagem da emulsão através de um leito poroso a fim de que as gotas sejam ali retidas até que ocorra o seu crescimento por coalescência. Em seguida, as gotas maiores são arrastadas para fora do leito, pelas forças hidrodinâmicas, e elevadas para a superfície da água por separação gravitacional. O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o comportamento da velocidade do fluido na eficiência de tratamento, para remoção de óleo emulsionado de efluentes através do processo de coalescedor de leito granular composto por resinas de trocas catiônicas. O efluente utilizado nos ensaios foi produzido por uma planta industrial que gera amostras de emulsão óleo-em-água (O/A) sintética. O óleo utilizado no preparo dessa emulsão foi petróleo médio com densidade API de 28,3°, enquanto que o coalescedor com leito de resinas operou em fluxo vertical e ascendente. Para controle operacional foram medidas a vazão de saída do coalescedor e a pressão diferencial através do leito, esse último utilizado para determinação da permeabilidade. Para avaliação da influência da velocidade do fluido foram testados Teores de Óleos e Graxas com valores de 200 e 400 mg.L⁻¹ e valores de velocidade do fluido de 4,4; 8,7 e 17,4 m.h⁻¹. Além disso, buscou-se a identificação da velocidade crítica através do traçado de curvas da variação dos TOG na saída do processo em função da velocidade do fluido. Os resultados mostraram que a que a velocidade do fluido influencia na eficiência do processo de modo inversamente proporcional para os valores testados. Mostraram ainda a ocorrência de uma velocidade do fluido ótima, em vez de crítica.

PALAVRAS-CHAVE: Coalescedor de leito, coalescência, catiônicas, emulsão, óleo, petróleo

INTRODUÇÃO

Apesar da existência de inúmeros métodos de separação óleo-água atualmente, nem sempre, a técnica de separação selecionada não satisfaz os requisitos desejados. Aliado a isso, determinadas técnicas, apresentam

desvantagens significativas, como elevados investimentos, elevados custos operacionais, uma baixa eficiência de separação e operação do processo com um tempo de residência demasiadamente elevado (LI; GU, 2005).

O processo de tratamento com coalescedor de leito consiste em se induzir a separação das gotas de óleo emulsionadas em água, pela passagem da emulsão através de um leito poroso a fim de que as gotas sejam alí retidas até que ocorra o seu crescimento por coalescência. Em seguida, porções de óleo sob a forma de gotas maiores, são arrastadas para fora do leito, pelas forças hidrodinâmicas, e elevadas para a superfície da água por separação gravitacional (HAZLET, 1969).

Os tipos de leito utilizados podem ser de fibra ou granular. O primeiro apresenta uma maior eficiência, apesar de ser mais vulnerável a obstruções por sólidos, que, às vezes, são inevitáveis. Além disso, sua estrutura relativamente complexa dificulta sobremaneira o processo de limpeza (SPIELMAN; SU, 1977).

Coalescência por leito é um fenômeno complexo, afetado por inúmeros fatores. Uma possível forma de agrupar as propriedades pertinentes e as variáveis do processo é: as propriedades de óleo disperso, propriedades do material do leito, a natureza do meio de filtração e variáveis operacionais (GOVEDARICA *et al.*, 2013).

Qualquer coalescedor que tem o objetivo de tratar dispersões de óleo deve, primeiro, ser capaz de capturar as gotas e, em seguida, mantê-las muito próximas das outras gotas. A captura de uma gota suspensa numa fase fluida contínua é teoricamente possível, devido a colisão dessa gota de acordo com uma ou mais de uma das seguintes possibilidades:

- Colisão com outra gota suspensa na corrente da dispersão;
- Colisão com uma obstrução na estrutura do leito como a fibra ou grão que compõe esse leito;
- Colisão com outras gotas que foram capturadas pelo leito e estão ligadas à sua estrutura (SAREEN *et al.*, 1966).

De acordo com Sareen *et al.* (1966) a probabilidade de ocorrência da captura por colisão das gotas da fase suspensa entre si é muito baixa. A segunda possibilidade, a de colisões das gotas com a estrutura do leito (fibras ou grãos), é muito mais importante, principalmente durante a fase inicial de operação do processo, quando o leito ainda está relativamente limpo de óleo. Entretanto, a taxa de captura das gotas se eleva consideravelmente no caso da terceira possibilidade, quando ocorre a colisão das gotas com outras gotas que já foram capturadas pelo leito e estão ligadas à sua estrutura (IBRAHIM, 2011; AUSTIN; JEFFREYS, 1981).

Em determinados casos, contudo, a colisão das gotas entre si pode ser significativa na eficiência do processo, conforme verificaram esses autores. Com o aumento da concentração de óleo na corrente de alimentação, a densidade de gotículas de óleo aumenta, considerando-se que a distribuição de tamanho de gotículas de óleo permaneça inalterada. Isso resulta em um aumento das colisões entre as gotas de óleo na corrente da dispersão, o que pode melhorar a eficiência global de coalescência (LI; GU, 2005). Ressalta-se que esses autores trabalharam com Teores de Óleos e Graxas (TOG) na alimentação (TOGa) de 2000, 5000 e 10.000 mg.L⁻¹.

Entre as variáveis operacionais destaca-se a velocidade do fluido (v), considerada um parâmetro de fundamental importância para o correto desempenho do processo, pois ela é responsável pelo controle de vários outros fenômenos, como o mecanismo e a probabilidade de captura das gotas de óleo, a distribuição da fase dispersa nos regimes de fluxo de óleo e a redispersão do óleo retido (SOKOLOVIĆ; GOVEDARICA; SOKOLOVIĆ, 2010).

Os mecanismos de captura das gotas de óleo são similares aos que ocorrem no processo de filtração rápida de Estação de Tratamento de Água, ou seja, impacto inercial, interceptação indireta, difusão, sedimentação e atração eletrostática.

Alguns autores (SAREEN *et al.*, 1966; SPIELMAN, 1968) usaram o termo velocidade crítica (v_c) no coalescedor, definida como a velocidade a partir da qual o TOGa influencia, de modo significativo, no TOG de saída do coalescedor (TOGs); abaixo da v_c essa influência ocorre, mas apenas de forma bastante reduzida (SOKOLOVIĆ; SOKOLOVIĆ; DOKOVIĆ, 1997).

Essa definição de v_c , contudo, diverge da de outros pesquisadores (LI; GU, 2005), que afirmaram que na curva de variação da eficiência do coalescedor, em termos de remoção de óleo (E) contra a velocidade (ou do TOGs contra a velocidade), existe um intervalo de valores de v no qual uma melhor eficiência pode ser alcançada. Esse aspecto caracteriza uma velocidade ótima, em vez de crítica.

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente o comportamento da velocidade do fluido na eficiência de tratamento, para remoção de óleo emulsionado de efluentes através do processo de coalescedor de leito granular composto por resinas de trocas catiônicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O efluente utilizado nos ensaios foi produzido pela unidade geradora de emulsões (UGE), uma planta industrial que gera amostras de emulsão óleo-em-água (O/A) sintética. O óleo utilizado no preparo dessa emulsão foi petróleo médio (densidade API entre 22° e 30°). Sua densidade API foi de 28,3°, enquanto que sua densidade relativa foi de 0,8824 kg.L⁻¹.

A Unidade Experimental utilizada está apresentada na Figura 1. O coalescedor foi constituído por um tubo de PVC, disposto na posição vertical, com diâmetro de 100 mm e altura de 85 cm. O tubo continha, no seu interior, o leito granular objeto deste estudo e mais alguns dispositivos internos que tinham a função de dar suporte a esse leito e de atenuar a turbulência. Para controle operacional foram medidas a vazão de saída do coalescedor (Q_s) e a pressão diferencial através do leito (Δp), o primeiro para determinação da velocidade do fluido e esse último para determinação da permeabilidade.

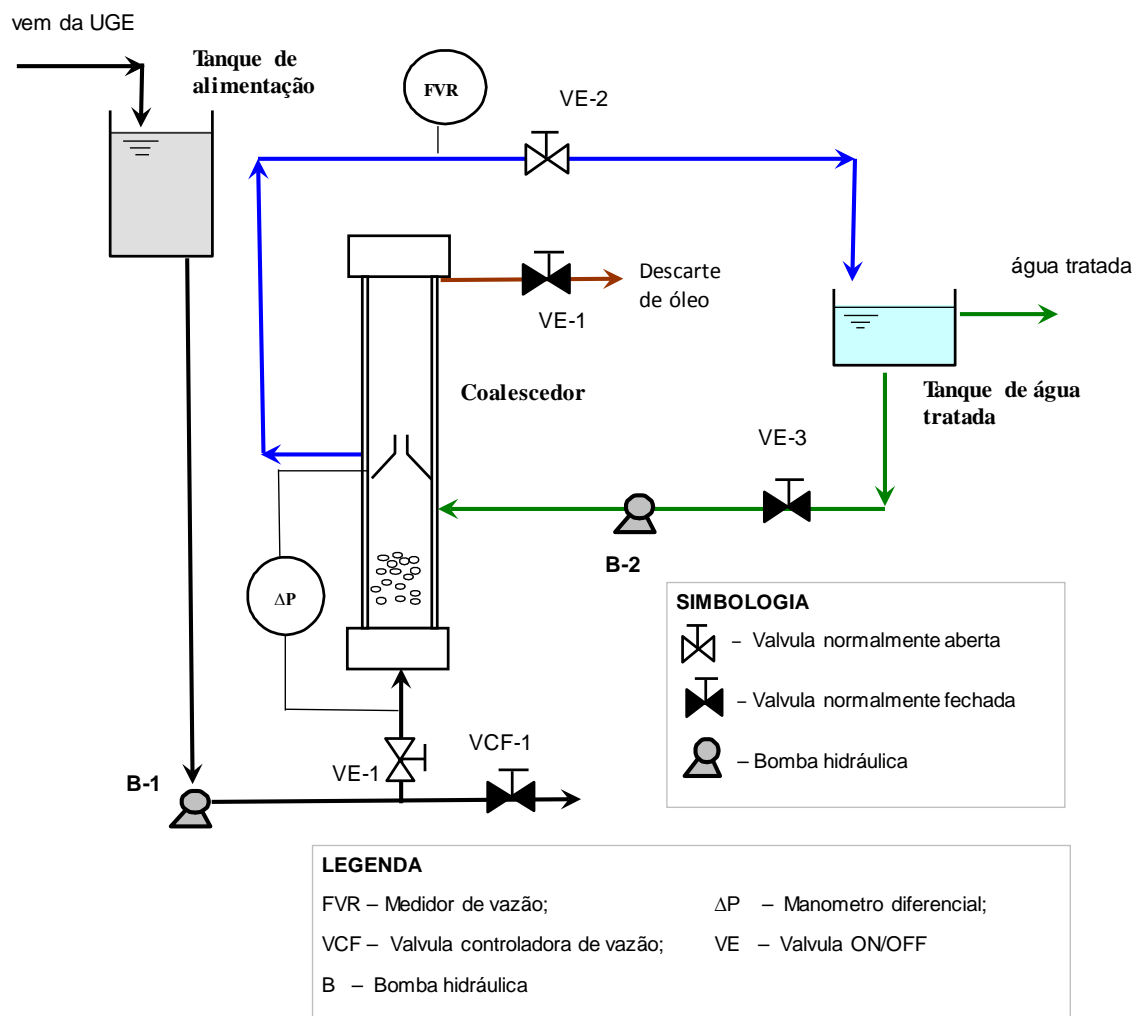


Figura 1 - Fluxograma da unidade experimental para o pré-tratamento de efluentes oleosos através de coalescedor de leito granular.

Fonte: Autor (2014).

O leito granular possuía uma porosidade média de 0,40 e era formado por resinas de trocas catiônicas com diâmetros entre 0,425 e 1,275 mm.

As determinações do TOG foram feitas através da sua correlação com as medidas da turbidez, utilizando o turbidímetro portátil Hach 2100P. Para determinação do diâmetro de gotas, o equipamento utilizado foi o MALVERN MASTER SIZER.

Para avaliação da influência da velocidade buscou-se a verificação do comportamento da eficiência de remoção de óleo ao longo do tempo (E), para valores de TOGa de 200 e 400 mg.L⁻¹ e diferentes valores de velocidade (4,4; 8,7 e 17,4 m.h⁻¹) e a identificação da velocidade crítica (v_c), processo que foi feito através do traçado de curvas da variação dos TOGs em função da velocidade, para o TOGa de 200 mg.L⁻¹. Essas curvas foram feitas para diferentes tempos de operação do teste: decorridas 2, 3 e 4 e 6 horas após iniciados os testes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme citado previamente, a velocidade do fluido (v) é responsável pelo controle de vários fenômenos, como o mecanismo e a probabilidade de captura das gotas de óleo, a distribuição da fase dispersa nos regimes de fluxo de óleo e a redispersão do óleo retido (SOKOLOVIĆ; SOKOLOVIĆ; DOKOVIĆ, 1997).

A Figura 2 mostra o comportamento da eficiência de remoção de óleo ao longo do tempo, para valores de TOGa de 200 e 400 mg.L^{-1} e diferentes valores de velocidade: 4,4; 8,7 e 17,4 m.h^{-1} .

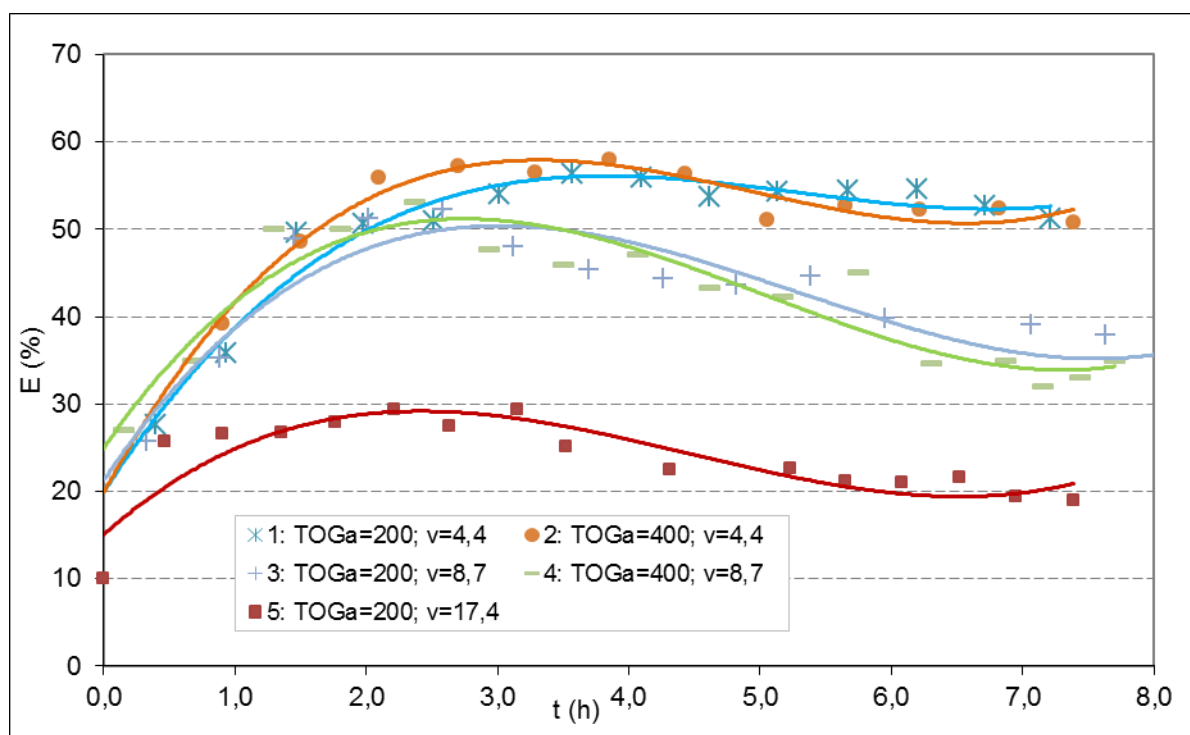


Figura 2 – Influência da velocidade do fluido ($v= 4,4, 8,7$ e $17,4 \text{ m.h}^{-1}$) na eficiência do processo para valores de TOGa de 200 e 400 mg.L^{-1}

Fonte: Autor (2014).

Como pode ser observado na, a eficiência (E) varia ao longo do tempo de operação processo, de acordo com três estágios distintos: o primeiro estágio, fortemente ascendente, o segundo decrescente, mas de forma relativamente branda, e o terceiro estágio, caracterizado pela tendência de manutenção da E constante com o tempo.

Uma possível explicação para esse comportamento em três estágios pode estar relacionada com as três possibilidades de captura de uma gota suspensa em uma fase fluida contínua, citadas anteriormente.

No primeiro estágio, como o leito ainda está praticamente limpo, as gotas são capturadas predominantemente, devido à colisão das mesmas com os grãos que formam o leito. À medida que as gotas vão se fixando a estrutura do leito, a eficiência do processo começa a aumentar, evidenciando que as gotas fixadas a estrutura do leito possuem uma influência maior no processo de captura das gotas suspensas na dispersão do que a estrutura do leito limpa.

O decaimento brando de E verificado no segundo estágio pode ter várias causas possíveis. Uma delas é a elevação da velocidade intersticial devido a redução da permeabilidade real causada pelo acúmulo gradual de óleo no interior do leito. Essa elevação contribui para dificultar a captura das gotas, já que a velocidade interfere em todos os mecanismos de captura das gotas, conforme já comentado.

Outra possível causa é a seguinte: quando a gota de óleo que se aproxima do leito se choca contra o filme de óleo ou outras gotas já capturada e ligada à estrutura do leito, existe um filme formado pela fase contínua (no

caso água) entre elas que precisa ser drenado e rompido para que ocorra a coalescência. Esse processo requer um tempo, chamado tempo de descanso (KINTNER; MCAVOY, 1970 apud SHERONY; KINTNER, 1971). É possível que, no nosso caso, durante esse tempo a gota seja arrastada para fora do leito sem que tenha havido tempo suficiente para a ocorrência da coalescência.

Em ambos os casos citados, pelo fato de não terem coalescido, essas gotas não tem diâmetro suficientemente elevado para possibilitar com que flitem e cheguem ao topo do coalescedor (segundo a lei de Stokes). Como consequência, as gotas não coalescidas são arrastadas pela corrente do fluido para fora dessa unidade.

Um aspecto que pode contribuir para agravar ainda mais a situação em ambos os casos citados acima é a existência de emulsificantes ou tensoativos na dispersão, compostos que são adsorvidos na superfície das gotas e contribuem para dificultar a ocorrência de coalescência. Esse é o caso da dispersão utilizada para os ensaios deste trabalho que, pelo fato de ter o petróleo, na sua composição, possui também tensoativos naturais. Desses tensoativos se destacam os asfaltenos e resinas, emulsificantes naturais do petróleo (THOMAS, 2001).

O terceiro estágio ocorre a partir de um tempo aproximado de 6 a 6,5 horas. Nesse estágio, o sistema opera em estado estacionário e a eficiência do processo tende a se manter constante.

Sobre a influência de v sobre E , pode-se observar que os valores desse último (E) decrescem, à medida que os do primeiro (v) aumentam. Isso ocorre tanto para o TOGa de 200 mg.L^{-1} quanto para o de 400 mg.L^{-1} . Neste caso, observa-se que os maiores valores de eficiência do processo são obtidos para o menor valor de velocidade testado (curvas 1 e 2; $v=4,4 \text{ m.h}^{-1}$). Por outro lado, o menor valor de eficiência é obtido para o maior valor de v (curva 5; $v=17,4 \text{ m.h}^{-1}$).

Esse aspecto é esperado, uma vez que, conforme descrito e comentado anteriormente, a velocidade influencia nos mecanismos de captura das partículas (impacto inercial, interceptação indireta, difusão, sedimentação e atração eletrostática), ou seja, maiores valores de velocidade, resultam em menores chances das gotas serem capturadas pelo leito do coalescedor.

O aumento do TOGs (e redução do E) como resultado da utilização de maiores valores de velocidade pode ser explicado pelo fato de que a elevação desse último parâmetro resulta no aumento do número de gotículas de óleo que passam pelo leito saturado com óleo, sem que esse leito seja capaz de retê-las. Além disso, como citado previamente, com velocidades mais altas não deve haver tempo suficiente para que ocorra a coalescência após a captura de algumas gotas.

A diferença de eficiência observada pode ser significativa, em alguns casos. Neste trabalho, para o TOGa de 200 mg.L^{-1} , no tempo de 7,0 h (próximo do estado estacionário para todos os ensaios) os valores aproximados de E para as velocidades de 4,4, 8,7 e $17,4 \text{ m.h}^{-1}$ foram de 52, 35 e 20%, respectivamente. Para o TOGa de 400 mg.L^{-1} , nesse mesmo tempo, os valores aproximados de E para v de 4,4 e $8,7 \text{ m.h}^{-1}$, foram de atingindo 51 e 34%, respectivamente.

Para identificação da velocidade crítica (v_c) foram traçadas curvas da variação dos TOGs em função da velocidade, para o TOGa de 200 mg.L^{-1} . Essas curvas foram feitas para diferentes tempos de operação do teste: decorridas 2, 3 e 4 e 6 horas após iniciados os testes (Figura 3).

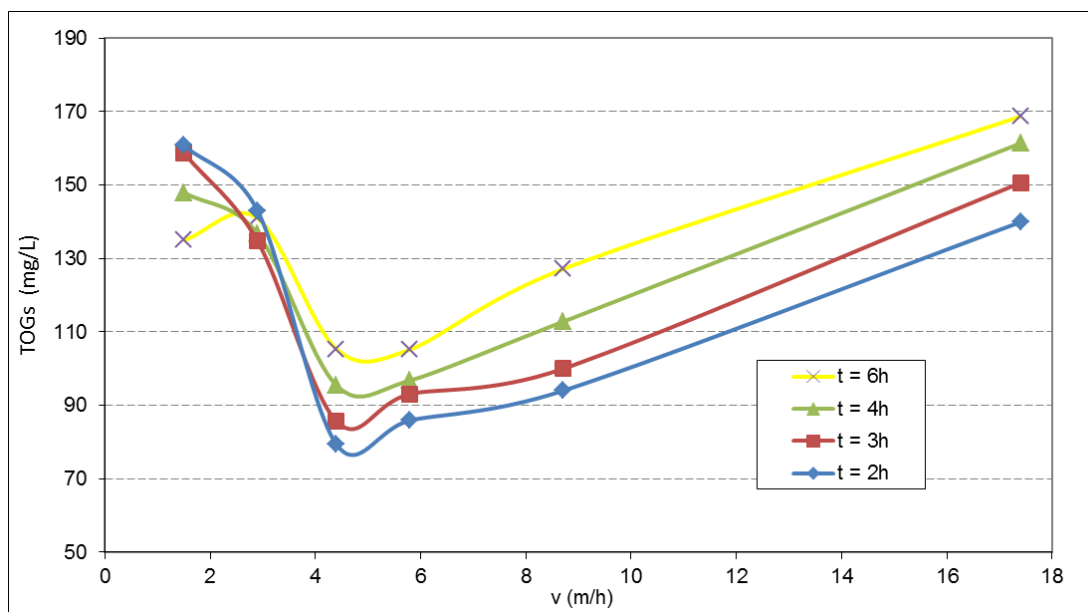


Figura 3 - Variação do TOGs em função da velocidade do fluido, para TOGa de 200 mg.L⁻¹ e para diferentes valores de tempo de operação da planta.

Um aspecto relevante observado é que as curvas se comportam de forma praticamente semelhante para os diversos valores de tempo de operação, sendo ele antes ou depois de que o estado estacionário seja atingido. Nesse comportamento, a curva está dividida em dois trechos: o primeiro decrescente e o segundo crescente.

Observa-se que, no segundo trecho de cada uma das curvas, para valores de velocidade do fluido acima de 4,4 m.h⁻¹, há uma variação do TOGs linear e diretamente proporcional em relação à variação da velocidade. Essa variação é significativa, indicando que um aumento de v resulta em uma elevação acentuada dos TOGs para um aumento de v.

Por outro lado, no primeiro trecho das curvas, verifica-se que, para valores de v abaixo de 4,4 m.h⁻¹, há uma variação do TOGs também linear, só que inversamente proporcional em relação à variação da velocidade. Neste trabalho, portanto, verifica-se que o comportamento da curva de v em função de TOGs se assemelha mais ao comportamento que foi investigado e descrito por Li e Gu (2005), ou seja, de que existe um intervalo de valores de velocidade no qual uma melhor eficiência pode ser alcançada, caracterizando uma velocidade ótima.

CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas, com base nas observações do trabalho experimental desenvolvido, estão apresentadas a seguir.

A eficiência do processo, em termos de remoção de óleo, varia ao longo do seu tempo de operação e de acordo com três estágios distintos: o primeiro estágio, fortemente ascendente, o segundo decrescente, mas de forma relativamente branda, e o terceiro, constante com o tempo.

Sobre a influência da velocidade sobre a eficiência, foi observado que os valores desse último parâmetro decrescem, à medida que os do primeiro aumentam. Isso se verificou para ambos os valores de TOG na corrente de alimentação testados, tanto 200 mg.L⁻¹ quanto 400 mg.L⁻¹. Neste trabalho, os maiores valores de eficiência do processo foram obtidos para o menor valor de velocidade testado, ou seja, 4,4 m.h⁻¹. Por outro lado, o menor valor de eficiência foi obtido para o maior valor de velocidade, ou seja, 17,4 m.h⁻¹.

Outro importante aspecto está relacionado aos resultados obtidos para a curva do TOG na saída do processo em função da velocidade do fluido. Foi observada a existência de um valor de velocidade do fluido onde a

eficiência do processo obtida era máxima, aspecto que caracteriza a existência de uma foi a ocorrência de uma velocidade ótima, em vez de crítica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUSTIN, D. G.; JEFFREYS, G. V. Coalescence phenomena in liquid-liquid systems. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [S.l.], v. 31, 1981, p. 475-488.
2. GOVEDARICA, D.D.; SOKOLOVIĆ, R.M.S.; SOKOLOVIĆ, D.S.; SOKOLOVIĆ, S.M. A novel approach for the estimation of the efficiency of steady-state fiber bed coalescence. *Separation and Purification Technology*, v. 104, 2013, p. 268–275.
3. HAZLET, R.N. Fibrous bed coalescence of water: steps in the coalescence process. *I & E C F U N D A M E N T A L S*, v. 8, n. 4, 1969, p. 625-632.
4. IBRAHIM, S. Y. Capture mechanisms of oil droplet inside spherical particulate beds. *Petroleum Science and Technology*, [S.l.], v. 23, 2011, no. 1, p. 55-66.
5. LI, J.; GU, Y. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds. *Separation And Purification Technology*, Eindhoven, v. 42, n. 1, 2005, p. 1-13.
6. SAREEN, S.S.; ROSE, P.M.; GUDESEN, R.C. e KINTNER, R.C. Coalescence in Fibrous Bed. *A.I.Ch.E. Journal*, v. 12, n. 6, 1966, p. 1045-1050.
7. SOKOLOVIĆ, R.M.S.; GOVEDARICA, D.D.; SOKOLOVIĆ, D.S. Separation of oil-in-water emulsion using two coalescers of different geometry. *Journal of Hazardous Materials*, v. 175, 2010, p. 1001–1006.
8. SOKOLOVIĆ, R.M.S. ; SOKOLOVIĆ, S.M.; DOKOVIĆ, B.D. Effect of working conditions on bed coalescence of an oil-in-water emulsion using a polyurethane foam bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v.36, n. 11, 1997, p. 4949-4953.
9. SPIELMAN, L.A. Separation of finely dispersed liquid–liquid suspensions by flow through fibrous media, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1968.
10. SPIELMAN, L.A.; SU, Y.P. Coalescence of oil-in-water suspensions by flow through porous media, *Industrial. Engineering & Chemical Fundamentals*, v. 16, n. 2, 1977, p. 272-282.
11. THOMAS, J. E. (org.). **Fundamentos da engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.