

# Coagulação associada à microfiltração para o tratamento avançado de esgoto sanitário

## Coagulation associated with microfiltration for the advanced treatment of sewage

Carlos Magno de Sousa Vidal<sup>1</sup>  
José Roberto Campos<sup>2</sup>

### Resumo

As tecnologias de membranas filtrantes, dentre elas, a microfiltração, têm sido utilizadas com sucesso no tratamento avançado de águas residuárias, gerando efluentes que atendem a padrões de emissão restritivos e que ainda apresentam amplas potencialidades para reúso. Todavia, a principal limitação deste processo é a colmatação das membranas, fenômeno esse que pode ser minimizado por diversas alternativas, como por exemplo, a prévia coagulação dos afluentes destes sistemas. Neste contexto, a proposta desta pesquisa foi avaliar a coagulação associada à microfiltração tangencial para o tratamento avançado de efluentes gerados na ETE “Jardim das Flores”. Foram coletadas amostras de efluente do UASB, do tanque de aeração e do decantador secundário da referida ETE, as quais foram encaminhadas para o tratamento em unidade de microfiltração tangencial com capacidade de receber vazão de até 1m<sup>3</sup>/h. A membrana de microfiltração utilizada foi do tipo tubular, de polipropileno, com área efetiva de filtração de 0,036 m<sup>2</sup> e tamanho médio dos poros de 0,2 µm. Nos ensaios em que os efluentes da ETE foram coagulados, os valores de fluxo de permeado na microfiltração foram maiores quando comparados aos experimentos em que esses efluentes não foram submetidos à coagulação. Além disso, a coagulação contribuiu para melhor remoção de fósforo. Considerando todos os ensaios realizados nesta pesquisa, a microfiltração gerou efluente de excelente qualidade no que se refere à SST (ausente), DQO (< 20mg/L), turbidez (< 1,69 uT) e Fósforo (< 2,2 mgP/L). A coagulação seguida de microfiltração apresentou grande

---

1 Dr.; Biólogo; Professor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro Oeste-UNICENTRO; E-mail: cacavidal@yahoo.com.br

2 Dr.; Engenheiro Civil; Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo-EESC-USP; Email: marmagro@sc.usp.br

potencialidade no tratamento de efluentes gerados no UASB, tanque de aeração e decantador secundário da ETE “Jardim das Flores”.

**Palavras-chave:** microfiltração; tratamento avançado; esgoto sanitário; coagulação e reúso.

## **Abstract**

Microfiltration is among the filtering membrane technologies that have been used successfully in advanced wastewater treatment, generating effluents that meet restrictive emission standards and still have ample reuse potential. However, the main limitation of this process is the membranes colmatation, a phenomenon that can be minimized by several alternatives, such as the previous coagulation of the influents of these systems. The research aim was to evaluate the coagulation associated with crossflow microfiltration for an advanced treatment of effluents generated at the “Jardim das Flores” sewage treatment plant. Effluent samples were collected from the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), from the aeration tank and the secondary sedimentation tank of the same sewage treatment plant. The samples were sent for treatment in a crossflow microfiltration unit with an intake capacity of up to 1m<sup>3</sup>/h. The microfiltration membrane used was of a polypropylene tubular kind, with a 0.036 m<sup>2</sup> effective filtration area and average pore size of 0.2 µm. Experiments in which the effluents of sewage treatment were coagulated featured higher permeate flux values in microfiltration when compared with the experiments in which the effluents were not coagulated. Moreover, the coagulation improved phosphorus removal. Considering all of the experiments accomplished in this research, the microfiltration produced effluent with excellent quality of TSS (absentee), COD (< 20 mg/L), Turbidity (<1,69 uT) and phosphorus (< 2,2 mgP/L). The coagulation followed by microfiltration presented great possibilities of application in the advanced treatment of effluents generated in UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), aeration tank and secondary sedimentation tank of the “Jardim das Flores” sewage treatment plant.

**Key words:** microfiltration; advanced treatment; sewage; coagulation and reuse.

## **Introdução**

Metcalf e Eddy (2003) definem tratamento avançado como aquele necessário para remoção de constituintes em suspensão,

coloidais e dissolvidos, remanescentes do tratamento secundário convencional. Os mesmos autores destacam os principais fatores que justificam a necessidade do tratamento avançado de esgoto sanitário, entre eles:

- necessidade de remoção da matéria orgânica e sólidos suspensos residuais do tratamento secundário, com intuito de atender a padrões de emissão restritivos e adequação dos efluentes para reúso;

- remoção de SST residuais de modo a permitir desinfecção mais efetiva; remoção de nutrientes (principalmente N e P) para amenizar problemas de eutrofização dos corpos d'água;

- necessidade de remoção de substâncias inorgânicas (por exemplo, metais pesados) e orgânicas específicas, para atender a restritivos padrões de emissão e adequação dos efluentes para reúso industrial (águas de refrigeração, águas para caldeiras de baixa e alta pressão) e reúso potável indireto (recarga de aquíferos).

Nesse contexto, uma das alternativas que tem merecido destaque no cenário atual de tratamento avançado de águas residuárias é o uso de diferentes tipos de membranas filtrantes, entre elas, a de microfiltração. A tecnologia de membranas filtrantes tem sido aplicada para o pós-tratamento de esgoto sanitário nos últimos dez anos, com maior frequência em países como: Japão, China, Estados Unidos, Alemanha, França, Austrália, Iraque e Canadá. Nas Estações de Tratamento de Esgoto, por exemplo, em Sidney (Austrália), em que foram incorporados em seus fluxogramas, sistemas de microfiltração, houve grande aprimoramento da qualidade dos efluentes tratados, tornando-os adequados para atender padrões de emissão extremamente restritivos, no que se refere à turbidez, SST, DQO, DBO, coliformes totais e fecais, cistos e oocistos de protozoários,

bem como para grande parte de vírus presentes no esgoto sanitário (FANE, 1996).

De acordo com Malack e Anderson, (1996), quando a microfiltração é operada em escoamento tangencial, a formação da “torta” é limitada ou quase completamente suprimida por uma suspensão que flui paralelamente à superfície de filtração. Dessa forma, a microfiltração frontal tem sido atualmente substituída em operações em escala plena devido à rápida colmatação das membranas em comparação à operação das unidades em escoamento tangencial. Milisic (1986) aponta várias técnicas para mitigar a deposição de partículas nas membranas, como o uso de abrasivos, auxiliares de filtração e coagulantes. Utilizam-se também retrolavagens periódicas, ultrason e fluxos pulsados. Neste trabalho, com objetivo de minimização da colmatação, a unidade de microfiltração foi operada em escoamento tangencial combinada ao efeito de retrolavagens periódicas e prévia coagulação dos afluentes da microfiltração.

De acordo com Fane (1996), quando unidades de microfiltração são implementadas no tratamento avançado de esgoto, o efluente produzido é ausente de particulados e parcialmente desinfetado, com eficiência de remoção de *Escherichia coli*. usualmente superior a 99,99%.

Conjuntamente aos benefícios atribuídos à produção de água para reúso, quando se utilizam membranas filtrantes para pós-tratamento de esgoto sanitário – o que tem estimulado muito os consultores e pesquisadores vinculados a grandes organizações, tais como, International Water Association (IWA) e

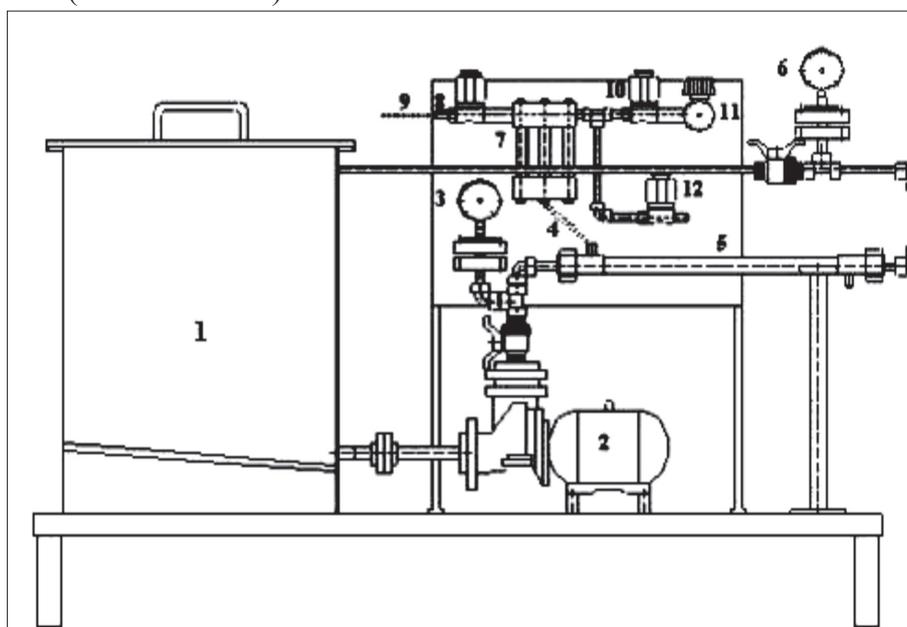
United States Environmental Protection Agency (USEPA) - são as vantagens atribuídas às unidades de microfiltração, tecnologia capaz de efetuar clarificação e remoção de bactérias (sem risco de formação de organo-halogenados) de forma simultânea, em sistema compacto, de simples ampliação, operação e automação. Aliada a esse fato, a eficiente separação sólido-líquido por membranas de microfiltração, permite atingir elevadas concentrações de biomassa em reatores biológicos, o que possibilita aumento da eficiência e diminuição do volume desses reatores quando associados às membranas filtrantes.

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a aplicabilidade da coagulação seguida da microfiltração tangencial para o tratamento avançado dos efluentes gerados nas principais unidades da Estação de Tratamento de Esgoto “Jardim das Flores” (Rio Claro - SP).

### **Materiais e Métodos**

A ETE “Jardim das Flores” possui em seqüência as seguintes unidades de tratamento: gradeamento (grosso e fino); caixa de areia aerada conjugada a peneira; quatro módulos de reatores UASB em paralelo e lodos ativados

**Figura 1.** Esquema da unidade piloto de microfiltração tangencial, unidade de tratamento avançado que recebeu as amostras de efluente do UASB, tanque de aeração e decantador secundário da ETE “Jardim das Flores” (Rio Claro – SP)



Fonte: Vidal (2001)

Legenda: (1) tanque de alimentação (60L); (2) bomba; (3, 6 e 11) manômetros; (4) saída do permeado até o recipiente visor; (5) módulo de membrana; (7) recipiente visor do permeado; (8, 10 e 12) – válvulas solenóides; (9) saída do permeado.

**Tabela 1.** Características do módulo de membrana inserido no sistema de microfiltração tangencial utilizado na pesquisa

Configuração geométrica	Tubular
Material	Polipropileno
Número de tubos	3
Diâmetro interno dos tubos	5,5 mm
Comprimento da membrana	75 cm
Área efetiva de filtração	0,036 m <sup>2</sup>
Máxima temperatura de operação	60°C
Diâmetro médio dos poros	0,2 µm

Fonte: Os autores

aeróbio constituído de tanque de aeração e dois decantadores secundários de alta taxa, em paralelo. A unidade piloto de microfiltração tangencial utilizada nesta pesquisa tem capacidade para tratar vazão média de até 1m<sup>3</sup>/h e é composta pelos elementos identificados na figura 1. A membrana de microfiltração utilizada foi do tipo tubular, de polipropileno, com área efetiva de filtração de 0,036 m<sup>2</sup> e tamanho médio dos poros de 0,2 µm. As características do módulo de membrana encontram-se na tabela 1.

Para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa foram coletadas amostras de efluente do UASB, do tanque de aeração e do decantador secundário, as quais foram encaminhadas para o tratamento na unidade piloto de microfiltração tangencial submetida à operação em batelada. Para cada amostra de esgoto coletada (efluente do UASB, tanque de aeração e decantador secundário) foram realizados dois ensaios; um ensaio sem coagulação e outro coagulando-se a amostra previamente em *jar-test* com gradiente médio de mistura rápida de 800 s<sup>-1</sup>; tempo médio de mistura rápida de 10s<sup>-1</sup> e dosagem de cloreto férrico de 60 mg/L (FeCl<sub>3</sub> sólido). Vale ressaltar que esta dosagem foi escolhida com base em bons resultados obtidos em

trabalho desenvolvido por Vidal (2001), anteriormente a esta pesquisa, em ensaios na mesma unidade de microfiltração tratando efluente de reator anaeróbio de leito expandido.

Durante a condução da pesquisa foram adotadas as seguintes condições operacionais na unidade piloto de microfiltração: velocidade tangencial média de 1,0 m/s, tempo de operação de 180 minutos e ΔP de 0,10 MPa. O volume de amostra de esgoto em cada ensaio de microfiltração foi de 36 litros e as amostras de permeado (efluente da microfiltração) foram coletadas a cada 30 minutos de operação. Para se obter o fluxo de permeado (taxa) na membrana de microfiltração, foi medido o volume obtido de permeado a cada trinta minutos de operação, dividindo-se esse valor pela área efetiva de filtração da membrana.

### Limpeza das membranas

Após o término de cada ensaio de microfiltração, limpou-se a membrana pelo seguinte método:

- inicialmente, eram circulados no sistema, vinte litros de água potável a 50°C por período de uma hora;
- posteriormente, eram circulados no sistema, vinte litros de solução de

ácido nítrico 3%, à 50°C, durante trinta minutos;

- Na etapa final, eram circulados no sistema, vinte litros de água potável, à 50°C, durante período de uma hora.

Esse método foi adotado com base em recomendação do fabricante da membrana, aliado a resultados obtidos com ensaios na unidade de microfiltração com água potável e amostras de efluente do tanque de aeração. Nesses ensaios foi possível verificar a eficiência do método, capaz de regenerar em mais de 90% o fluxo de permeado, tanto para água como para o esgoto e, desse modo, procurou-se manter, tanto quanto possível, a característica inicial da membrana para os diferentes ensaios realizados.

As análises físico-químicas (temperatura, pH, alcalinidade parcial e total, turbidez, fósforo total, DQO, SST, SSV e SSF) dos diferentes afluentes (efluentes do UASB, tanque de aeração e decantador secundário) e efluentes da unidade de microfiltração (permeado) foram mensuradas de acordo com a padronização descrita no Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater (1998).

## **Resultados e Discussão**

### **Análise do fluxo do permeado**

Nos ensaios de microfiltração com efluente do UASB (ensaios 1 e 2), verifica-se na figura 2, melhores resultados de fluxo, quando a amostra de efluente do UASB foi previamente submetida ao processo de coagulação. Na tabela 2 observa-se que o fluxo inicial no ensaio 2 foi praticamente o dobro do obtido no ensaio 1 e da mesma

forma para os resultados de média de fluxo durante o período de operação do sistema de microfiltração. Apenas o fluxo final foi um pouco menor no ensaio em que a amostra de efluente do UASB foi coagulada. As maiores diferenças de fluxos nestes ensaios ocorreram nos primeiros noventa minutos de operação e, após esse período, tende-se à estabilização e maior proximidade dos valores de fluxo nesses dois ensaios, conforme apresentado na tabela 2 e figura 2.

Nos ensaios de microfiltração com efluente do tanque de aeração (ensaios 3 e 4), verifica-se, na figura 3, desempenho bem superior da unidade de microfiltração, quando submetida à amostra coagulada do efluente do tanque de aeração. Na tabela 2 observa-se que o fluxo inicial do permeado foi aproximadamente cinco vezes superior ao ensaio 3, bem como maiores valores obtidos de média e fluxo final. Durante todo período de operação, as taxas obtidas na microfiltração foram maiores quando o efluente do tanque de aeração foi coagulado, de acordo com os dados apresentados na tabela 2. No ensaio 3, o fluxo tende à estabilização a partir dos 60 minutos de operação, e no ensaio 4, tende-se ao decaimento ao longo do período de operação. Da mesma forma que nos ensaios anteriores (ensaios 1 e 2), os fluxos iniciais são bem maiores na primeira hora de operação da unidade de microfiltração.

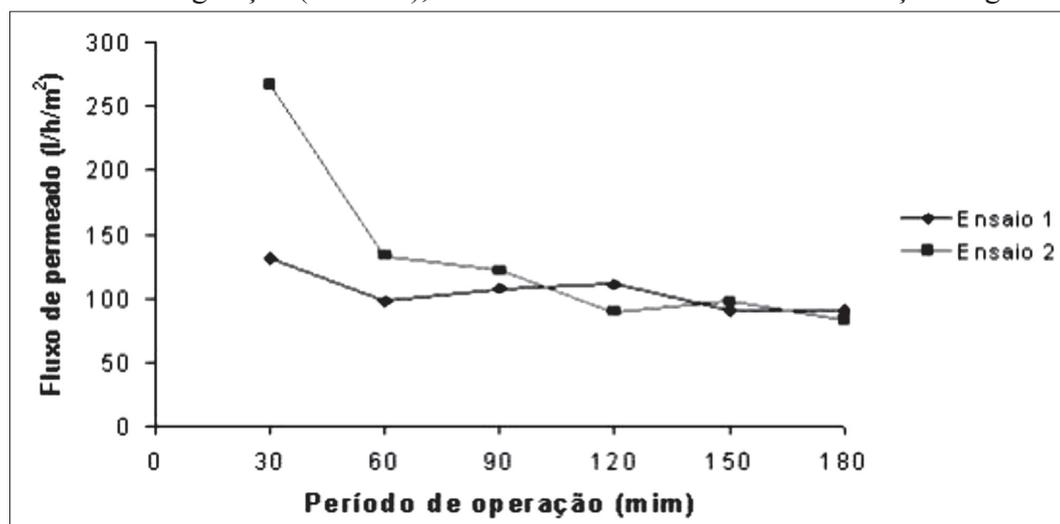
Por fim, nos ensaios com efluente do decantador secundário (ensaios 5 e 6), observa-se, na figura 4, comportamento similar aos ensaios anteriores, que demonstram o efeito benéfico da

**Tabela 2.** Resultados obtidos de valores médios, inicial e final do fluxo de permeado na operação do sistema de microfiltração tangencial em ensaios em batelada, com amostras de efluente do UASB (ensaios 1 e 2), tanque de aeração (ensaios 3 e 4) e decantador secundário (ensaios 5 e 6) sem e com prévia coagulação

Ensaios de microfiltração com efluentes (com e sem prévia coagulação) do UASB, tanque de aeração e decantador secundário	Média de fluxo do permeado (L/m <sup>2</sup> .h)	Fluxo inicial de permeado (L/m <sup>2</sup> .h)	Fluxo final de permeado (L/m <sup>2</sup> .h)
Ensaio 1 – UASB	105,5	131,1	91,1
Ensaio 2 - UASB coagulado	132,2	266,7	83,3
Ensaio 3 - Tanque de aeração	49,8	104,4	27,8
Ensaio 4 – Tanque de aeração coagulado	242,2	494,4	47,8
Ensaio 5 – Decantador secundário	56,0	117,8	25,0
Ensaio 6 – Decantador secundário coagulado	93,6	113,9	93,6

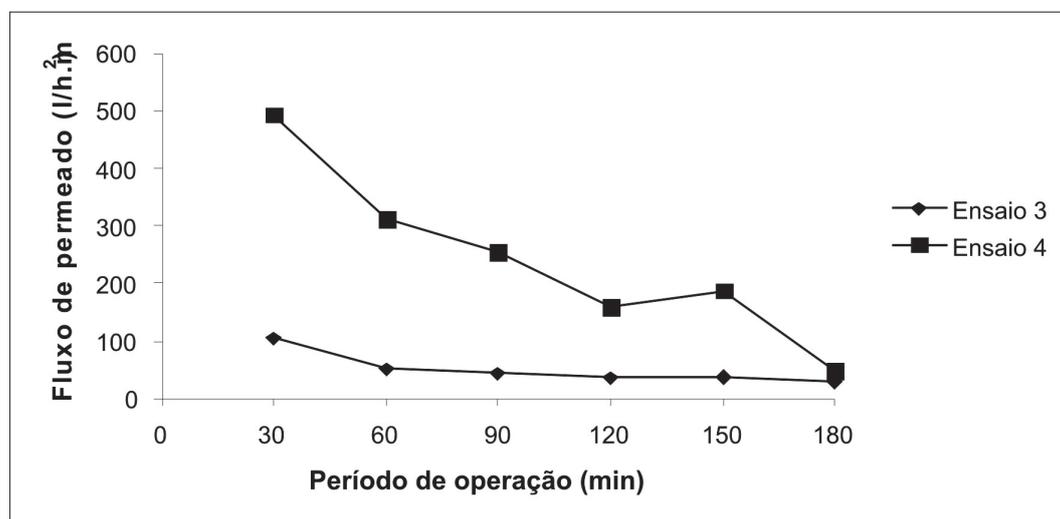
Fonte: Os autores

**Figura 2.** Fluxo do permeado em função do período de operação nos ensaios em batelada, com amostras de efluente do UASB sem (ensaio 1) e com prévia coagulação (ensaio 2), submetidas ao sistema de microfiltração tangencial



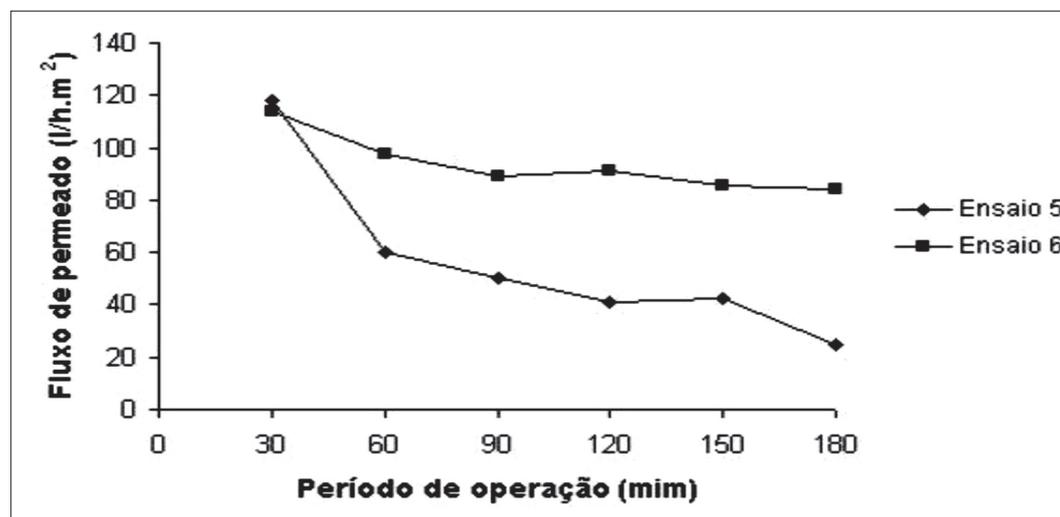
Fonte: Os autores

**Figura 3.** Fluxo do permeado em função do período de operação nos ensaios em batelada com amostras de efluente do tanque de aeração sem (ensaio 3) e com prévia coagulação (ensaio 4), submetidas ao sistema de microfiltração tangencial



Fonte: Os autores

**Figura 4.** Fluxo do permeado em função do período de operação nos ensaios em batelada com amostras de efluente do decantador secundário sem (ensaio 5) e com prévia coagulação (ensaio 6), submetidas ao sistema de microfiltração tangencial



Fonte: Os autores

coagulação do esgoto antes de ser submetido ao sistema de microfiltração tangencial, de modo a possibilitar maiores taxas. Os valores de fluxo inicial (tabela 2) nestes dois ensaios foram semelhantes, todavia o ensaio 6 apresentou média e fluxo final de permeado bem superior ao ensaio 5. Verifica-se na figura 4 maior estabilidade do fluxo no ensaio em que o efluente do decantador secundário foi coagulado (ensaio 6), em detrimento ao maior decaimento do fluxo no ensaio 5. É importante salientar também que os valores de fluxo no ensaio 6 foram em quase sua totalidade, superiores aos obtidos no ensaio 5.

A coagulação prévia dos efluentes das três referidas unidades de tratamento de esgoto da ETE “Jardim das Flores”, foi essencial para obtenção de maiores valores de fluxo de permeado na unidade de microfiltração. Esses resultados corroboram com os experimentos realizados por Malack e Anderson (1996), Vera et al. (1996), no pós-tratamento de efluentes secundários de estações de tratamento de esgoto submetidos à coagulação antes de serem microfiltrados.

É reportado na literatura que a fração coloidal, a qual compreende faixa de tamanho de partícula próximo ao diâmetro dos poros das membranas de microfiltração, é a principal responsável na colmatação destes tipos de membranas, ocasionando, na maioria das vezes, obstrução interna dos poros. Neste tipo de colmatação, a retrolavagem, bem como o escoamento de modo tangencial, não são suficientes para remoção dessas partículas da membrana.

O processo de coagulação permite a transformação de grande parte do material coloidal e dissolvido em fração particulada a qual é mais eficientemente removida nas membranas de microfiltração, de modo que os fenômenos de colmatação são minimizados. Segundo Vera et al. (1997), maiores agregados são mais eficientemente arrastados pelo efeito da velocidade de escoamento tangencial. É interessante observar na tabela 2 que a maior taxa média obtida na microfiltração foi para o efluente do tanque de aeração coagulado (Ensaio 4). O efluente, nesse ensaio, apresentou valores de DQO, SST e turbidez bem superiores aos demais (UASB e decantador secundário) e, mesmo assim, não influenciou de modo negativo nos valores obtidos de fluxo do permeado. Tal fato demonstra que nem sempre as taxas obtidas em unidades de microfiltração estão apenas associadas à concentração de sólidos suspensos totais e DQO, de modo a sugerir que a distribuição do tamanho e natureza das partículas possam ser fatores preponderantes na obtenção de maiores taxas nessas unidades. Vale ressaltar que em todos os ensaios foram mantidas as mesmas condições operacionais.

Apesar dos melhores resultados de fluxo de permeado obtidos no ensaio com efluente do tanque de aeração coagulado, o mesmo apresentou decaimento acentuado do fluxo, o que poderia comprometer os bons resultados obtidos se fossem adotados maiores tempos de operação, bem como em ensaios posteriores em escoamento contínuo. Muitas vezes a estabilidade do fluxo pode ser o fator

**Quadro 1.** Valores calculados das eficiências médias de remoção de turbidez e fósforo total alcançadas ao longo do período de operação do sistema de microfiltração tangencial, nos ensaios em batelada com amostras de efluente do UASB (ensaios 1 e 2), tanque de aeração (ensaios 3 e 4) e decantador secundário (ensaios 5 e 6) sem e com prévia coagulação

Ensaios com efluente do UASB, tanque de aeração e decantador secundário	Ensaio 1 UASB	Ensaio 2 UASB coagulado	Ensaio 3 tanque de aeração	Ensaio 4 tanque de aeração coagulado	Ensaio 5 decantador secundário	Ensaio 6 decantador secundário coagulado
Parâmetros	Eficiência média de remoção (%)					
Turbidez (uT)	99,5	98,7	99,8	99,8	98,8	98,9
P-total (mgP/L)	45,0	97,7	68,0	90,0	26,0	93,0

Fonte: Os autores

principal na avaliação do desempenho de sistemas de microfiltração tangencial.

### **Análise da remoção da turbidez, fósforo total, DQO e SST**

Para todos os ensaios realizados nesta etapa preliminar, observa-se no quadro 1, que as eficiências de remoção de turbidez no sistema de microfiltração foram muito elevadas, superior a 98% em todos os ensaios. Não foram constatadas significativas diferenças nas eficiências de remoção e nos valores absolutos de turbidez, quando a amostra de cada tipo de efluente era ou não submetida à prévia coagulação. Tais resultados demonstram grande eficiência de remoção de sólidos em suspensão e material coloidal (necessidade de coagulação) do esgoto quando se utiliza membrana de microfiltração de diâmetro médio de poro de 0,2 µm.

Para remoção de fósforo total, de acordo com os dados apresentados no quadro 1, verifica-se que, nos ensaios em que as amostras de esgoto foram

coaguladas, os resultados obtidos de eficiências médias de remoção foram bem superiores, evidenciando-se a necessidade do processo de coagulação associado a microfiltração na remoção de fósforo. Observa-se, na mesma tabela, que as eficiências médias de remoção de fósforo total foram superiores a 90% quando os efluentes do UASB, tanque de aeração e decantador secundário foram submetidos à coagulação. Nos ensaios com efluente do UASB, quando o mesmo foi coagulado, a unidade de microfiltração alcançou eficiência média de remoção de fósforo de 97,7% (maior valor obtido de todos ensaios) em detrimento aos 45 % obtidos no ensaio 1. Para os ensaios com efluente do tanque de aeração foi obtida boa eficiência média de remoção de fósforo total (68%) sem necessidade do processo de coagulação e 90 % quando esse efluente foi coagulado. Para os ensaios finais com efluente do decantador secundário, observa-se, no quadro 1, a menor eficiência (26%) obtida na ausência do processo de

coagulação. Na ocasião em que o efluente do decantador secundário foi coagulado, a unidade de microfiltração alcançou 93% de eficiência de remoção.

Na ausência do processo de coagulação, o desempenho da unidade de microfiltração foi superior no ensaio com efluente do tanque de aeração, o qual comparado aos demais, apresenta partículas de maior diâmetro (flocos), as quais são removidas de modo mais eficiente pelas membranas. O decantador secundário, pelo fato de gerar efluente com menor diâmetro de partículas, apresentou menor eficiência de remoção de fósforo, na ocasião em que não foi coagulado e diretamente microfiltrado.

Nos ensaios de microfiltração com efluente do UASB (turbidez de 98 uT), verifica-se, no quadro 2, que nas amostras de permeado não foi excedido o valor médio de 1,27 uT. O fósforo total, que na amostra bruta do UASB apresentou valor de 5,9 mgP/L, nas amostras de permeado, alcançou valor médio de 3,7 mgP/L no ensaio sem coagulação e, aproximadamente 0,1 mgP/L, coagulando-se o esgoto antes de ser microfiltrado.

Nos ensaios de microfiltração com efluente do tanque de aeração (turbidez de 831 uT), tanto para o ensaio 3, como para o ensaio 4, as amostras de permeado apresentaram baixos valores médios de turbidez (Quadro 2), menor ou igual a 1,69 uT. O fósforo total que, na amostra bruta do tanque de aeração, apresentou valor de 10,9 mgP/L, nas amostras de permeado o valor obtido foi de 3,5 mgP/L no ensaio sem coagulação e 1,1 mgP/L, coagulando-se o esgoto antes de ser microfiltrado.

Nos ensaios finais com efluente do decantador secundário (turbidez de

36,2 uT), os efluentes do sistema de microfiltração tangencial apresentaram valores médios menores que 0,5 uT nos dois ensaios (Quadro 2). O fósforo total que na amostra bruta do decantador secundário, apresentou valor de 6,1 mgP/L, nas amostras de permeado o valor obtido foi de 4,5 mgP/L no ensaio sem coagulação e 0,4 mgP/L, coagulando-se o esgoto antes de ser microfiltrado.

As amostras de permeado da microfiltração apresentaram concentrações de SST não mensuráveis para os métodos empregados nesta pesquisa, demonstrando a ausência praticamente total desses contaminantes no efluente da microfiltração.

Vale ressaltar que a membrana utilizada nos ensaios de quantificação de sólidos em suspensão apresentam diâmetro de poro de 1,2 µm, e por sua vez, a membrana de microfiltração apresentava diâmetro médio de poro seis vezes menor e, portanto, esse tipo de resultado já era esperado.

Os valores de DQO de todas as amostras de permeado (Quadro 2), apresentaram valores inferiores a 20 mg/L, limite de detecção da curva inserida no equipamento DR-2000, com base em valores sugeridos no Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater (1998).

Os valores de DQO foram inferiores a 20 mg/L, o que caracteriza excelentes resultados. Não foi possível, para esse parâmetro, avaliar as diferenças de remoção na ausência e presença de coagulação. Contudo foi possível constatar que, para remoção de DQO, a necessidade da coagulação é bem menor comparada à importância desse processo na remoção de fósforo.

**Quadro 2.** Resultados obtidos (em termos de valores médios) para os diferentes afluentes e efluentes na unidade de microfiltração

Efluente do UASB	ENSAIO 1 Efluente do UASB		ENSAIO 2 Efluente do UASB coagulado		Efluente do Tanque de Aeração	ENSAIO 3 Efluente do Tanque de aeração		ENSAIO 4 Efluente do Tanque de aeração coagulado		Efluente do Decantador Secundário	ENSAIO 5 Efluente do decantador secundário		ENSAIO 6 Efluente do decantador secundário coagulado	
	Parâmetros	Permeado	Permeado	Permeado		Permeado	Permeado	Permeado	Permeado		Permeado	Permeado	Permeado	Permeado
T (oC)	24	34	35	35	T (oC)	20	30	33	33	T (oC)	24	34	33	
pH	6,6	7,7	7,1	7,1	pH	5,4	4,0	3,5	3,5	pH	7,0	7,3	6,6	
Ale T (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	579	-	-	-	Ale T (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	Ale T (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	93	-	-	
Ale P (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	455	-	-	-	Ale P (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	-	-	-	Ale P (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	72	-	-	
Turb (uT)	98	0,48	1,27	1,27	Turb (uT)	831	1,69	1,59	1,59	Turb (uT)	36,2	0,44	0,40	
P-Total (mgP/L)	5,9	3,7	0,1	0,1	P-Total (mgP/L)	10,9	3,5	1,1	1,1	P-Total (mgP/L)	6,1	4,5	0,40	
DQO t (mg/L)	126	< 20	< 20	< 20	DQO t (mg/L)	775	< 20	< 20	< 20	DQO t (mg/L)	45	< 20	< 20	
DQO f (mg/L)	67	-	-	-	DQO f (mg/L)	-	-	-	-	DQO f (mg/L)	<20	-	-	
SST (mg/L)	85	-	-	-	SST (mg/L)	415	-	-	-	SST (mg/L)	43	-	-	
SSV (mg/L)	65	-	-	-	SSV (mg/L)	299	-	-	-	SSV (mg/L)	-	-	-	
SSF (mg/L)	20	-	-	-	SSF (mg/L)	116	-	-	-	SSF (mg/L)	-	-	-	

Nota: (-) não foi realizada a análise.

Fonte: Os autores

A temperatura dos efluentes da microfiltração aumentava ao longo do período de operação, de acordo com os dados apresentados no quadro 2. Esse aumento está relacionado à geração de calor devido ao atrito do fluxo na membrana e trabalho de bombeamento. Tal fato é benéfico ao fluxo do permeado, na medida em que diminui a viscosidade do esgoto, no entanto, convém ressaltar que a membrana utilizada suporta temperatura de até 60° C, o que poderia impossibilitar o uso para longos períodos de operação em batelada, a menos que a operação do sistema fosse interrompida para diminuição da temperatura, ou através da incorporação no sistema, de uma serpentina ou torre de resfriamento.

## Conclusões

De acordo com os experimentos realizados com vistas a avaliar a aplicabilidade da coagulação conjugada à microfiltração para o tratamento avançado dos efluentes gerados nas principais unidades da ETE “Jardim das Flores”, pode-se concluir que:

- Nos ensaios em que os efluentes do UASB, tanque de aeração e decantador secundário foram coagulados, as taxas obtidas na unidade de microfiltração foram maiores quando comparadas aos experimentos em que esses efluentes não foram submetidos previamente ao processo de coagulação;

## Referências

FANE, A. G. Membranes for water production and wastewater reuse. *Desalination*, n.106, p. 1-9. 1996.

MALACK, M. H.; ANDERSON, G. K. Coagulation-crossflow microfiltration of domestic wastewater. *Journal of Membrane Science*. n. 121, p. 59 – 70, 1996.

- A maior taxa média obtida no sistema de microfiltração tangencial foi para o ensaio com efluente do tanque de aeração, previamente coagulado (242L/m<sup>2</sup>.h);

- A eficiência média de remoção de turbidez na unidade de microfiltração para todos os ensaios realizados foi superior a 98,7 %. O maior valor médio obtido de turbidez em todas as amostras coletadas de permeado foi de apenas 1,69 uT;

- Para remoção de fósforo total, nos ensaios em que as amostras de esgoto foram coaguladas, os resultados obtidos de eficiências médias de remoção na unidade de microfiltração foram bem superiores (maior que 90 %), quando comparadas aos ensaios na ausência da coagulação. Coagulando-se o esgoto, as amostras de permeado apresentaram valores médios de fósforo inferior a 1,1 mgP/L;

- A DQO dos efluentes do sistema de microfiltração foram baixas, em sua totalidade inferiores a 20 mg/L;

- A coagulação prévia dos efluentes do UASB, tanque de aeração e decantador secundário, foi essencial, não só para obtenção de maiores taxas na unidade de microfiltração, como também para maior remoção de fósforo;

- O sistema de microfiltração tangencial apresentou grande potencialidade no tratamento avançado dos efluentes gerados no UASB, tanque de aeração e decantador secundário da ETE “Jardim das Flores”.

METCALF, L.; EDDY, H. P. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 4.ed., New York: McGraw-Hill, 1819 p. 2003.

MILISIC, V. Anti-fouling techniques in cross-flow microfiltration. *Filtration separation*, n. 23, v.6, p 347 - 349. 1986.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 19<sup>th</sup> Ed American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation, Washington DC, USA, 1995.

VERA, L.; LÓPEZ, V.; DELGADO, S.; ELMALEH, S. Cross-flow microfiltration of biologically treated wastewater. *Desalination*, n. 114, p 65-75, 1997.

VIDAL, C. M. S. *Microfiltração tangencial como alternativa de pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido alimentado com esgoto sanitário*. 2001. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.