

II-426 - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO E DA RESISTÊNCIA EM MEMBRANAS ASSOCIADAS A BIORREATORES ANAERÓBIOS

Letícia Molin⁽¹⁾

Graduada em Engenharia Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul (UCS), Mestranda em Engenharia e Ciências Ambientais na UCS.

Juliano Rodrigues Gimenez⁽²⁾

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (1997), Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (2002) e Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS (2013). Atualmente é Professor da Universidade de Caxias do Sul – UCS.

Lademir Luiz Beal⁽³⁾

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande (1991), mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1995) e doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2004). Atualmente é professor da Universidade de Caxias do Sul.

Ana Paula Rodrigues Torres⁽⁴⁾

Graduada em Química Atribuições Tecnológicas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1996), Mestre em Bioquímica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é Pesquisadora Senior em Biotecnologia na PETROBRAS/CENPES com ênfase em Bioprocessos.

Endereço⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾: R. Francisco Getúlio Vargas, 1130 - Petrópolis, Caxias do Sul – RS – CEP: 95070-560 - Tel: (54) 3218-2100 – e-mail⁽¹⁾: lmolin@ucs.br

RESUMO

Biorreatores anaeróbios associados a membranas (AnMBR, do inglês, *anaerobic membrane bioreactors*) vem sendo considerados como alternativas atraentes e vantajosas em relação aos sistemas convencionais de tratamento anaeróbio e mesmo de membranas associadas a biorreatores aeróbios (MBR). Além de reconhecidas vantagens operacionais, sua popularização nos últimos anos se deve à produção de biogás, que torna os sistemas uma fonte de energia renovável, além de uma ferramenta de tratamento de resíduos. Apesar de a tecnologia ser madura e bem desenvolvida, processos de digestão anaeróbia associados a membranas esbarram em desafios inerentes a todos os processos com membranas, ou seja, os fenômenos relacionados à restrição de fluxo. Para que o reator anaeróbio tenha autonomia operacional para a otimização da produção de biogás, é indispensável que as membranas não constituam um fator limitante ao processo. Neste cenário, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de obter e analisar dados experimentais de fluxo de permeado e a correspondente resistência total e aspectos operacionais relacionados para o efluente de um reator UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) em membranas poliméricas de fibras ocas de ultrafiltração, a fim de determinar quão limitantes é esta tecnologia quando associada a reatores anaeróbios. Os resultados, além apresentarem dados experimentais que subsidiam a aplicação da tecnologia de membranas em processos anaeróbios, evidenciam que a tecnologia de membranas não é uma alternativa limitadora em relação a incrementos no arraste de sólidos do reator decorrentes de ajustes no tempo de detenção hidráulico e tempo de retenção celular, visando otimizar a degradação da matéria orgânica e a produção de biogás ou ainda, aumentar o volume tratado em um reator já estabelecido.

PALAVRAS-CHAVE: AnMBR, *fouling*, resistências em série, fluxo de permeado, comportamento hidrodinâmico.

INTRODUÇÃO

A demanda crescente de soluções não somente para o tratamento de efluentes, como também para disponibilização de recursos renováveis para a sociedade, especialmente energia, vem estimulando o desenvolvimento de aplicações para biorreatores anaeróbios associados a membranas (AnMBR, do inglês, *anaerobic membrane bioreactors*). Processos baseados nesta configuração têm explorado a separação de biomassa empregando membranas como um fator para o incremento de eficiência. As membranas, por sua vez,

representam uma solução efetiva, com vantagens do ponto de vista econômico e energético quando comparadas a processos convencionais de separação, apesar da escassez de parâmetros de projeto e de condições de operação detalhadas justamente para aplicações emergentes e promissoras. Neste contexto, cita-se a produção de biogás.

Mao et al. (2015) afirmam que a teoria e a tecnologia da produção de biogás é madura e bem desenvolvida, sendo que o que deve ser estudado são alternativas de otimização. Para tal, é fundamental a compreensão das particularidades do sistema operando em conjunto e de cada uma das suas partes.

O comportamento e a operação de biorreatores anaeróbios, citando-se os do tipo UASB como principais, especialmente no contexto da produção de biogás (CHEN et al., 2016; MAO et al., 2015) são diferentes quando isolados e quando associados a membranas. Nesta última configuração, o incremento da eficiência é relacionado à desvinculação e controle do tempo de detenção hidráulico (TDH) e tempo de retenção celular (TRC), além do confinamento total da biomassa no sistema garantido pelas membranas. Trabalhos nesse escopo (OZGUN et al., 2015; HUANG, ONG e NG, 2011; PELÁEZ, SAGASTUME e NOYOLA, 2011; AN et al., 2009; GOUVEIA et al., 2015) demonstram que, diminuindo-se o TRC em relação ao TDH tem-se melhoras em termos de degradação de matéria orgânica e produção de biogás. No entanto, a diminuição do tamanho médio de partícula no reator e o arraste de sólidos devido ao aumento da velocidade ascensional e, conseqüentemente da tensão de cisalhamento, é um efeito colateral na busca pela maior eficiência do biorreator. Neste contexto, as membranas têm papel fundamental, garantindo também a qualidade do efluente final.

De forma geral, a predição do comportamento de reatores biológicos para tratamento de efluentes é complexa. O projeto de sistemas de AnMBR baseia-se não somente em fatores biológicos, mas também hidrodinâmicos. Em relação a estes, a queda do fluxo de permeado decorrente dos fenômenos de *fouling* é um fator limitante à empregabilidade de membranas em processos de tratamento dos pontos de vista operacional e econômico. No caso de reatores anaeróbios associados a membranas, Skouteris et al. (2012), a partir de uma revisão abrangente da aplicação de biorreatores anaeróbios associados a membranas submersas no período de 2006 a 2012, concluem que os aspectos referentes ao *fouling*, especificamente a formação da torta, consistem nos parâmetros-chave para a aplicabilidade destes sistemas. Adicionalmente, os autores destacam a importância de levantar dados a respeito do consumo energético nestes sistemas. Estes aspectos também foram enfatizados no trabalho de Lin et al. (2013) e, mais recentemente, de Meng et al. (2017) e Krzeminski et al. (2017).

O estabelecimento de um modelo geral para descrever o *fouling* em membranas é dificultado pela heterogeneidade inerente aos sistemas, entretanto a natureza e a extensão do *fouling* em MBR é fortemente influenciada pelas características da biomassa, pelas condições operacionais e pelas características da membrana (Chang et al., 2002). Apesar de demandarem tempo e serem por vezes considerados dispendiosos, os trabalhos experimentais em escala de bancada são imprescindíveis, tanto devido às particularidades de cada tipo de biomassa, bem como das interações desta com as diferentes alternativas de configurações de membranas.

O objetivo principal deste trabalho, neste cenário, é obter e analisar dados experimentais de fluxo de permeado e a correspondente resistência total para efluente de um reator UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) em membranas poliméricas de fibras ocas de ultrafiltração. Adicionalmente, pretende-se compreender o comportamento das membranas no que se refere aos aspectos operacionais pressão transmembrana e concentração de sólidos suspensos totais a fim de determinar quão limitantes é esta tecnologia quando associada a reatores anaeróbios.

Os resultados pretendem subsidiar o avanço de pesquisas e aplicações das tecnologias de membranas em processos anaeróbios, oportunizando a adoção de parâmetros de projetos mais otimizados para processos similares. Estas tecnologias poderão estar associadas à geração de subprodutos de valor comercial, conciliando de forma sustentável os aspectos econômicos e ambientais.

MATERIAIS E MÉTODOS

As membranas empregadas no experimento tratam-se um módulo comercial do tipo fibra oca reforçada ZeeWeed® de ultrafiltração com tamanho de poro nominal de 0,04 μm , desenvolvidas pela ZENON Inc. e atualmente produzidas e comercializadas pela GE Power. São constituídas por fluoreto de polivinilideno (PVDF), e o módulo com fibras de 110 mm de comprimento resulta em área de permeação de 0,047 m^2 .

Os ensaios foram desenvolvidos em uma unidade experimental estruturada para um sistema MBR completo, localizada no Laboratório de Tecnologias Ambientais (LATAM) na Universidade de Caxias do Sul. A unidade é constituída por componentes de diversos fabricantes e gerenciada por um sistema eletrônico informatizado e por um programa computacional supervisorío

Para este experimento, utilizou-se uma bomba peristáltica dosadora, controlada a partir do sistema supervisorío na modalidade “malha fechada”, ou seja, era controlada automaticamente pela pressão estabelecida para o sistema, já que o ensaio foi conduzido à pressão constante. Para tal, foi empregado um sensor de pressão, além de um sensor de vazão de permeado. As tomadas de dados de vazão de permeado e pressão transmembrana foram feitas a cada 30s pelo sistema eletrônico informatizado. O permeado, depois de passar pelo sensor de vazão, retorna ao tanque de membranas, em circuito fechado. O tanque de membranas fez uso de um agitador magnético com o propósito de manter a concentração de sólidos constante ao longo da altura do tanque. (Figura 1). Para esta configuração, o tipo de filtração é frontal ou *dead-end*.

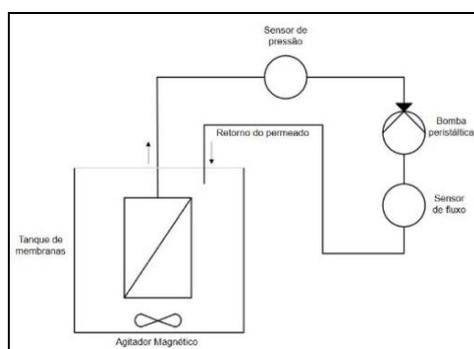


Figura 1: Esquema do aparato experimental.

A solução de alimentação empregada no ensaio experimental consiste em efluente real de um reator UASB tratando águas residuais de uma indústria alimentícia, concentrado com lodo anaeróbico do mesmo reator. Foram estabelecidas cinco concentrações de sólidos suspensos totais (SST) distintas, resultando em cinco soluções de alimentação ao módulo de filtração diferentes, sendo que o efluente à saída do reator tem concentração de sólidos suspensos totais (SST) equivalente a 806,67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. As outras quatro concentrações, obtidas através da adição de lodo anaeróbico com concentração de sólidos suspensos totais superior a 80.000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, tem concentrações equivalentes a 5.000 $\text{mg SST}\cdot\text{L}^{-1}$, 10.000 $\text{mg SST}\cdot\text{L}^{-1}$, 20.000 $\text{mg SST}\cdot\text{L}^{-1}$ e 40.000 $\text{mg SST}\cdot\text{L}^{-1}$.

Cada concentração foi submetida a três carreiras de filtração com duração de 6 h cada, com pressões de sucção de 140, 260 e 380 mbar. A cada intervalo de ciclo, o módulo de membranas foi submetido à limpeza química e retrolavagem, sendo caracterizada quanto à resistência intrínseca da membrana antes de cada novo ensaio.

A primeira fase de cada ensaio consistiu na submissão do módulo de membranas à operação sob condições de pressão de sucção e concentração de SST da solução de alimentação pré-determinadas. Para tal, a solução foi preparada antes do ensaio, procedendo a concentração do efluente com lodo a fim de atingir o valor de SST alvo. Com o tanque de membranas preenchido com a solução de alimentação e as conexões devidamente realizadas, inicia-se a operação do sistema em malha fechada durante 4 h contínuas de filtração. Ao final das 4 h de ensaio, a bomba peristáltica foi desligada e o módulo de membranas foi mantido conectado à tubulação de sucção. A solução de alimentação foi substituída, então, por água destilada. A membrana foi submetida à filtração em pressão constante durante 2 h, com procedimento idêntico ao descrito na etapa anterior, com o objetivo de determinar a resistência relacionada ao *fouling*.

O fluxo de permeado (J_p) foi calculado pela vazão de permeado por unidade de área da membrana, conforme equação:

$$J_p = (1 \cdot A^{-1}) (dV \cdot dt^{-1}) \quad \text{Equação (1)}$$

sendo J_p o fluxo de permeado ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), A é a área de permeação da membrana (m^2) e dV/dt o volume de permeado (m^3) coletado em função do tempo de permeação (s).

Alguns modelos para representar o transporte através da membrana são o modelo da transferência de massa (teoria do filme) e o modelo da pressão osmótica. AWWA (1996) sugere a aplicação do modelo das resistências em série como o mais frequentemente utilizado para biorreatores associados a membranas. Este modelo iguala o fluxo à pressão transmembrana dividida pela viscosidade do fluido multiplicado pela resistência total, que, por sua vez, pode ser a soma de cada uma das parcelas que a compõe, conforme a equação:

$$J_p = PTM \cdot (\mu \cdot R_T)^{-1} \quad \text{Equação (2)}$$

sendo PTM a pressão transmembrana (Pa), μ a viscosidade do fluido (Pa·s), e R_T a resistência total (m^{-1}).

Segundo Cheryan (1998), este modelo descreve o comportamento do fluxo em relação à pressão de forma mais abrangente. Com respaldo deste modelo, Sombatsompop (2006) afirma que quanto maior for a pressão transmembrana (PTM) e o fluxo (J_p), mais rápido os sólidos serão retidos na superfície da membrana formando a torta. A partir de então o fluxo é independente da pressão transmembrana, e permanece constante

As resistências ao fluxo avaliadas neste experimento consistem na resistência intrínseca da membrana (R_M), na resistência relacionada ao *fouling* e na resistência total (R_T), que inclui a anterior, ambas avaliadas na unidade m^{-1} . Determinou-se a R_M realizando tomadas de fluxo a diferentes pressões com água destilada, depois de compactar a membrana. A R_T foi obtida através do ensaio com efluente a pressão constante, sendo que esta varia ao longo do tempo. Para ambas, emprega-se a equação deduzida diretamente da equação do fluxo de permeado:

$$R_T = PTM \cdot (\mu \cdot J_p)^{-1} \quad \text{Equação (3)}$$

Quanto à viscosidade do permeado, tendo-se em mente sua interferência no fluxo de permeado e sua relação com a temperatura, normalizou-se a temperatura de operação para 20°C conforme a Equação 4. Foram realizadas tomadas manuais de temperatura da solução de alimentação a cada 15 min. Para fins de cálculo, empregou-se a viscosidade dinâmica da água, uma vez que se verificou através de determinação em viscosímetro do tipo rotativo da marca Brookfield, modelo LV DV-I+ com adaptador ULA-EY UL que a viscosidade da água é muito próxima a do permeado.

$$J_{20} = (\mu_T \cdot \mu_{20}^{-1}) \cdot (1 \cdot A^{-1}) (dV \cdot dt^{-1}) \quad \text{Equação (4)}$$

sendo J_{20} o fluxo de permeado normalizado a 20°C ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), μ_T a viscosidade dinâmica do permeado na temperatura de operação ($N \cdot s \cdot m^{-2}$) e μ_{20} a viscosidade dinâmica do permeado a 20°C ($N \cdot s \cdot m^{-2}$).

O sistema supervisor da Unidade Experimental foi configurado para registrar dados de vazão (volume em função do tempo) a cada 30 s de ensaio. A cada 30 min de ensaio o programa produziu um arquivo no formato .txt, os quais foram convertidos no formato .xls para análise com o programa Microsoft Excel 2016 e obtenção dos dados secundários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS SOLUÇÕES DE FILTRAÇÃO

As características físicas referentes à granulometria de cada concentração testada são apresentadas na Figura 2 e consistem na média de análises em triplicata para cada concentração. Os resultados evidenciam um incremento nos diâmetros com o aumento da concentração de sólidos totais, constituindo uma diferença

significativa quanto a constituição granulométrica de cada solução com impacto potencial no comportamento hidrodinâmico durante a filtração.

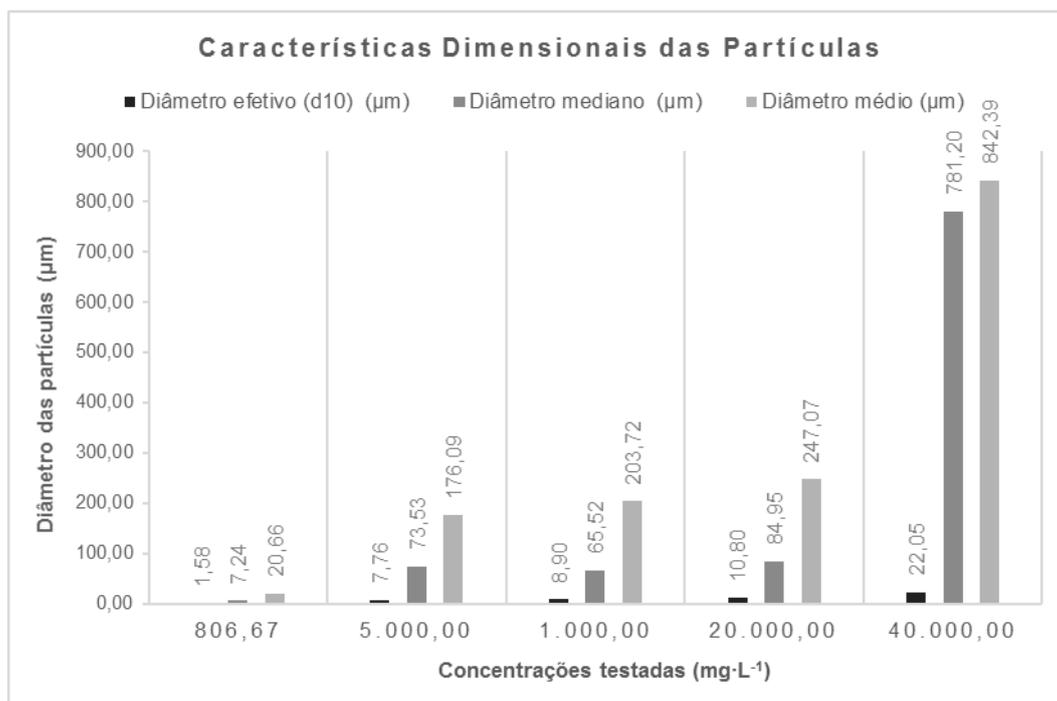


Figura 2: Resultado gráfico da caracterização física das soluções quando à granulometria: diâmetro efetivo, diâmetro mediano e diâmetro médio.

FLUXO DE PERMEADO E RESISTÊNCIA TOTAL

Os resultados apresentados a seguir estão organizados em conjuntos de dados de isoconcentração e isopressão. Os valores referentes à resistência total (R_T) incluem a parcela correspondente à resistência intrínseca da membrana (R_M), com valor inicial equivalente a $1,43 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$. A R_M foi determinada antes de cada novo ensaio. No entanto, o tempo de ensaio executado não evidenciou padrão conclusivo quanto ao desenvolvimento de *fouling* do tipo irreversível. Atribui-se a variação observada ao procedimento de lavagem mecânica e química da membrana após cada ensaio, já que não se observou relação com a concentração de sólidos ou pressão transmembrana do ensaio associado a R_M medida. A faixa de valores de R_M observados é de $1,06 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$ a $1,67 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-1}$.

• CURVAS DE ISOCONCENTRAÇÃO

Nas figuras seguintes está representado de forma gráfica o comportamento dos parâmetros fluxo de permeado normalizado a 20°C (J_{20}) e resistência total (R_T) agrupados por concentração, para cada pressão transmembrana (140, 260 e 380 mbar).

É evidente uma forte influência da pressão transmembrana (PTM) sobre a resistência total (R_T) nos conjuntos de dados obtidos: quanto maior ΔP , mais rápido o aumento de R_T . No entanto, o fluxo de permeado (J_{20}) não segue o mesmo padrão de R_T . As curvas de isoconcentração evidenciam que o fluxo de permeado tem comportamento similar em todas as pressões, apesar do incremento de PTM sugerir um aumento proporcional em J_{20} , o que não se observa. Comportamento similar decorre para cada concentração.

Para todos os ensaios realizados, pode-se dizer que, de forma geral, o período que compreende os primeiros 40 min de operação é o que apresenta maior variação de J entre as concentrações e pressões avaliadas, sendo que, a partir deste, observa-se regularização do fluxo bastante similar para todas as condições ensaiadas. Quanto à resistência, observa-se uma tendência à estabilização em grau levemente menor à do fluxo, mas

também relevante. Neste estado, todas as combinações de concentração e pressão tem valores de fluxo de permeado, semelhantes, entre $1,5$ e $2,0 \cdot 10^{-6}$ avaliado em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, evidenciando fraca relação entre a concentração de sólidos suspensos totais com o fluxo de permeado.

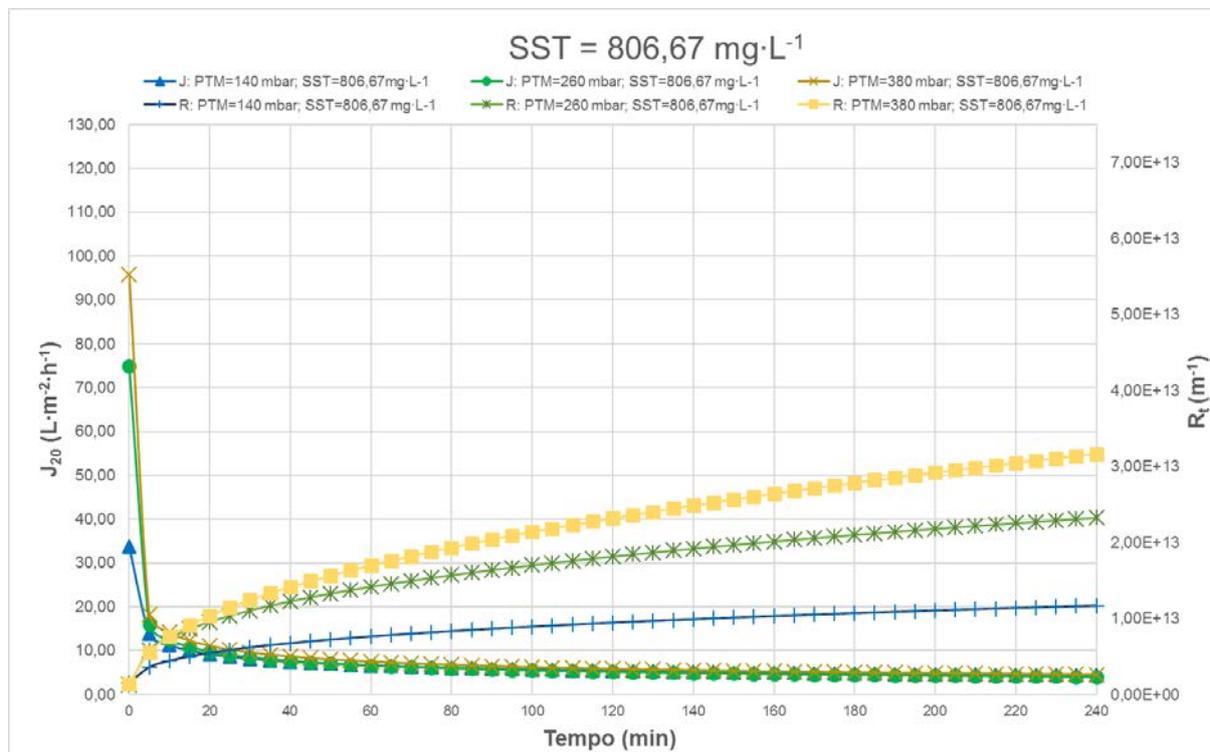


Figura 3: Comportamento de R_T e J a 20°C para as condições de concentração $806,67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e pressões 140, 260 e 380 mbar.

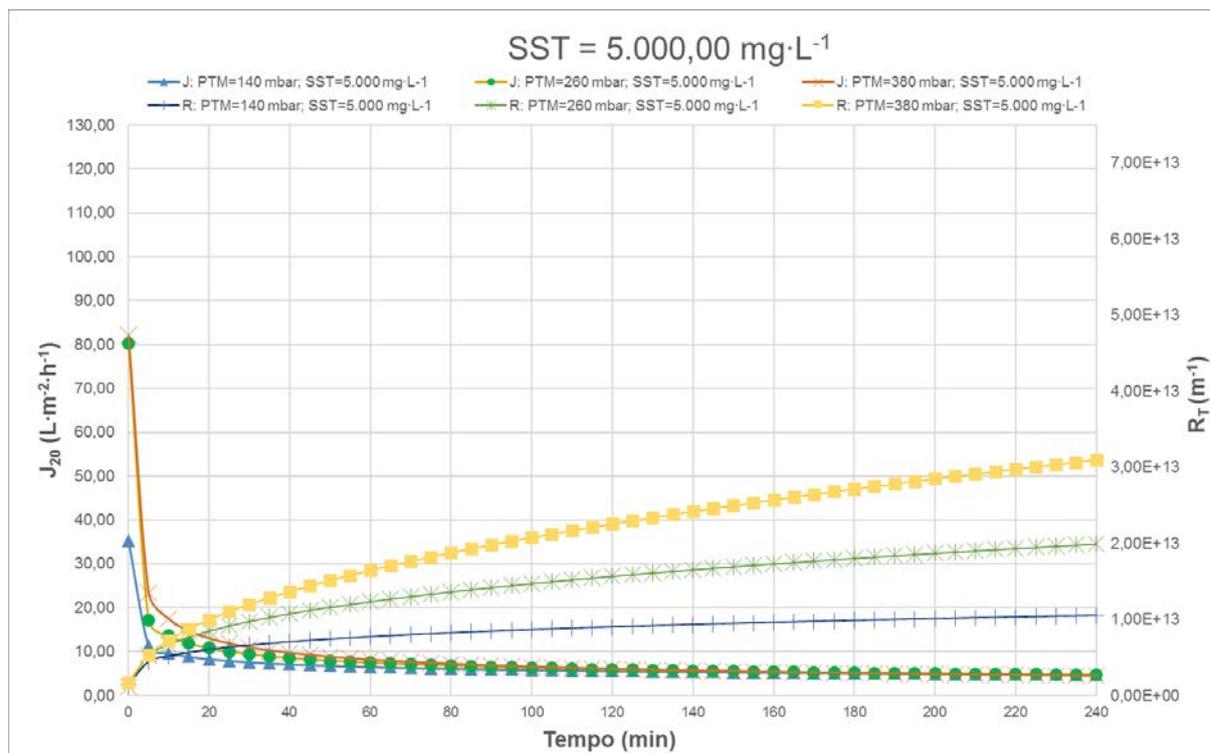


Figura 4: Comportamento de R_T e J a 20°C para as condições de concentração $5.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e pressões 140, 260 e 380 mbar.

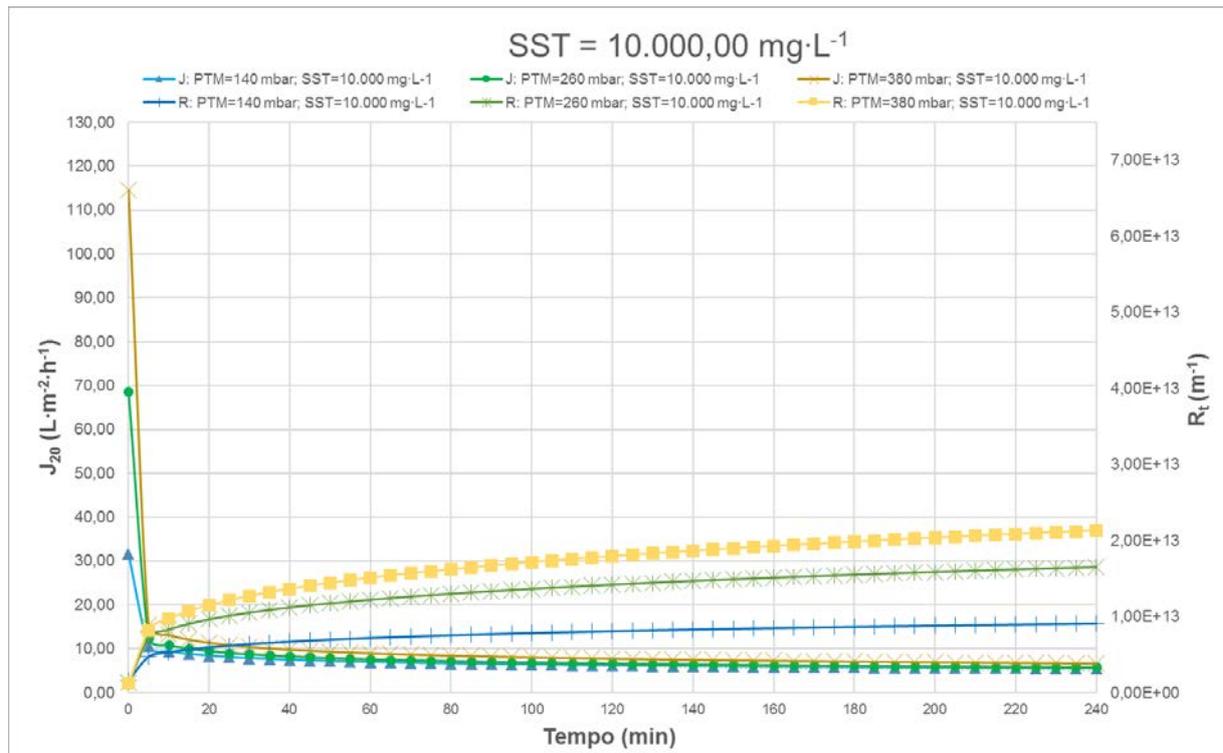


Figura 5: Comportamento de RT e J a 20°C para as condições de concentração 10.000 mg·L⁻¹ e pressões 140, 260 e 380 mbar.

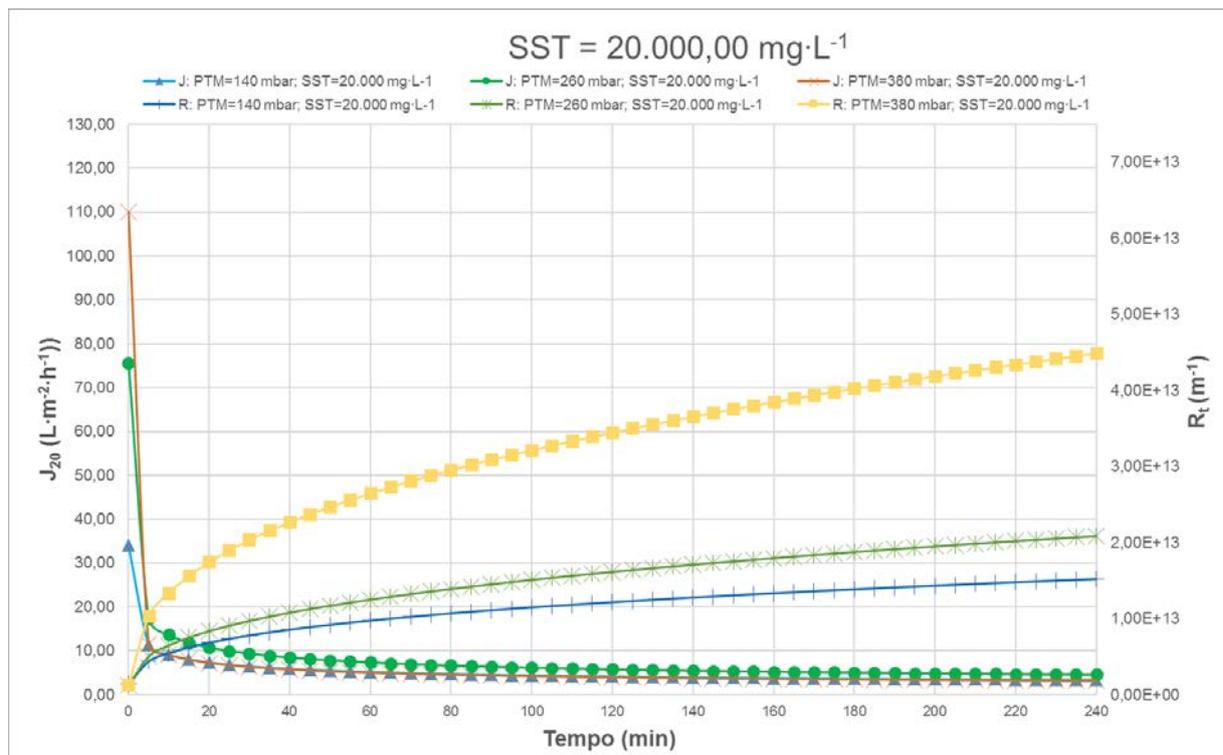


Figura 6: Comportamento de RT e J a 20°C para as condições de concentração 20.000 mg·L⁻¹ e pressões 140, 260 e 380 mbar.

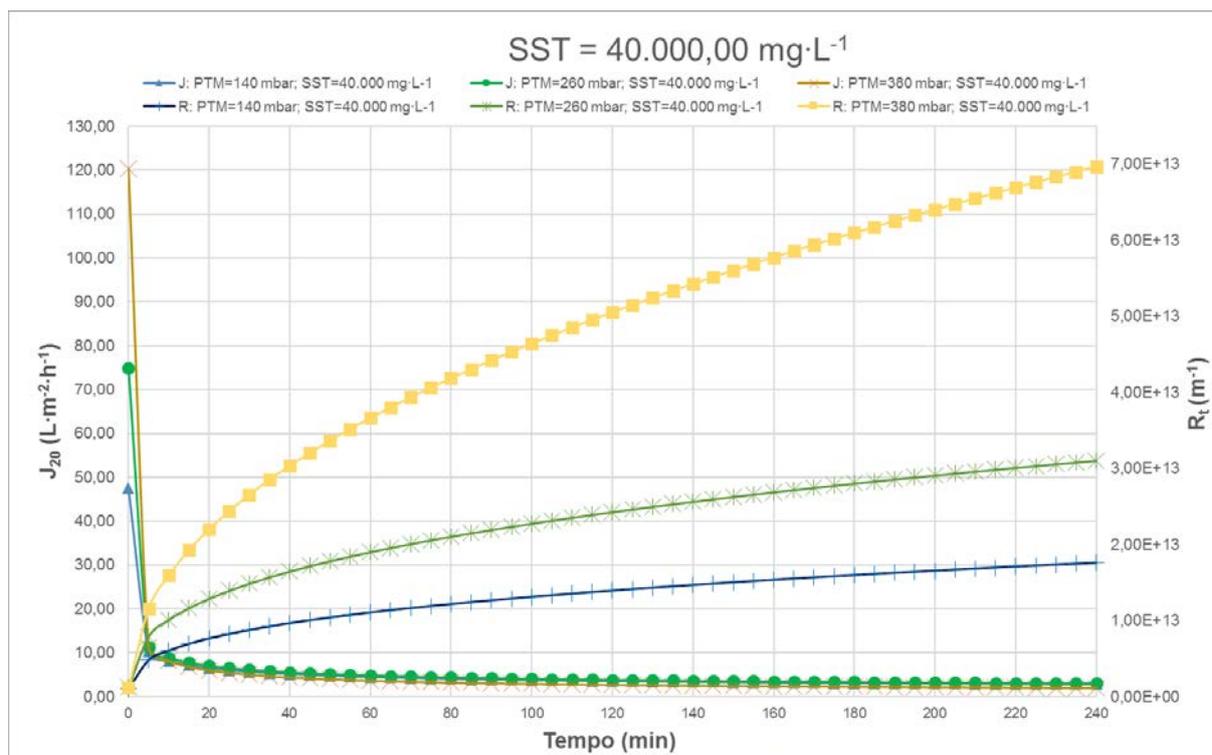


Figura 7: Comportamento de RT e J a 20°C para as condições de concentração 40.000 mg·L⁻¹ e pressões 140, 260 e 380 mbar.

• CURVAS DE ISOPRESSÃO

O comportamento da queda de fluxo em relação ao aumento da resistência total é apresentado nas figuras subsequentes. Cada gráfico representa o comportamento das cinco concentrações de SST testadas, para cada pressão: 140, 260 e 380 mbar.

Comparando-se as curvas de isoconcentração e de isopressão quanto à resistência total, observa-se que, para uma mesma pressão, independentemente da concentração de sólidos na solução de alimentação, o comportamento ao longo do tempo é muito similar. A resistência total, neste caso, se comprova mais dependente da pressão transmembrana do que o fluxo de permeado.

Um aspecto não observado nas curvas de isoconcentração e evidenciado nas Figuras 8, 9 e 10 é o comportamento em relação à R_T das concentrações mais baixas, especificamente a faixa de valores de 806,67 a 10.000 mg·L⁻¹. Para estes valores, o desenvolvimento da resistência total acentuou-se ao longo do tempo de forma mais evidente do que a concentração imediatamente superior, equivalente a 20.000 mg·L⁻¹. A justificativa associada a este comportamento encontra-se nas diferenças, mesmo sutis, da distribuição granulométrica destas soluções. Destacam-se o pequeno tamanho de partícula da solução de concentração 806,67 mg·L⁻¹, que é o efluente puro. O diâmetro mediano das partículas presentes é de 7,24 µm, equivalente ao tamanho de microrganismos comuns presentes em efluentes anaeróbios, especialmente bactérias. O provável mecanismo de bloqueio associado à concentração de 806,67 mg·L⁻¹, portanto, deve referir-se a esta característica. É importante observar, então, que a distribuição granulométrica da solução é mais relevante do que a concentração de sólidos totais no que se refere ao desenvolvimento da resistência total.

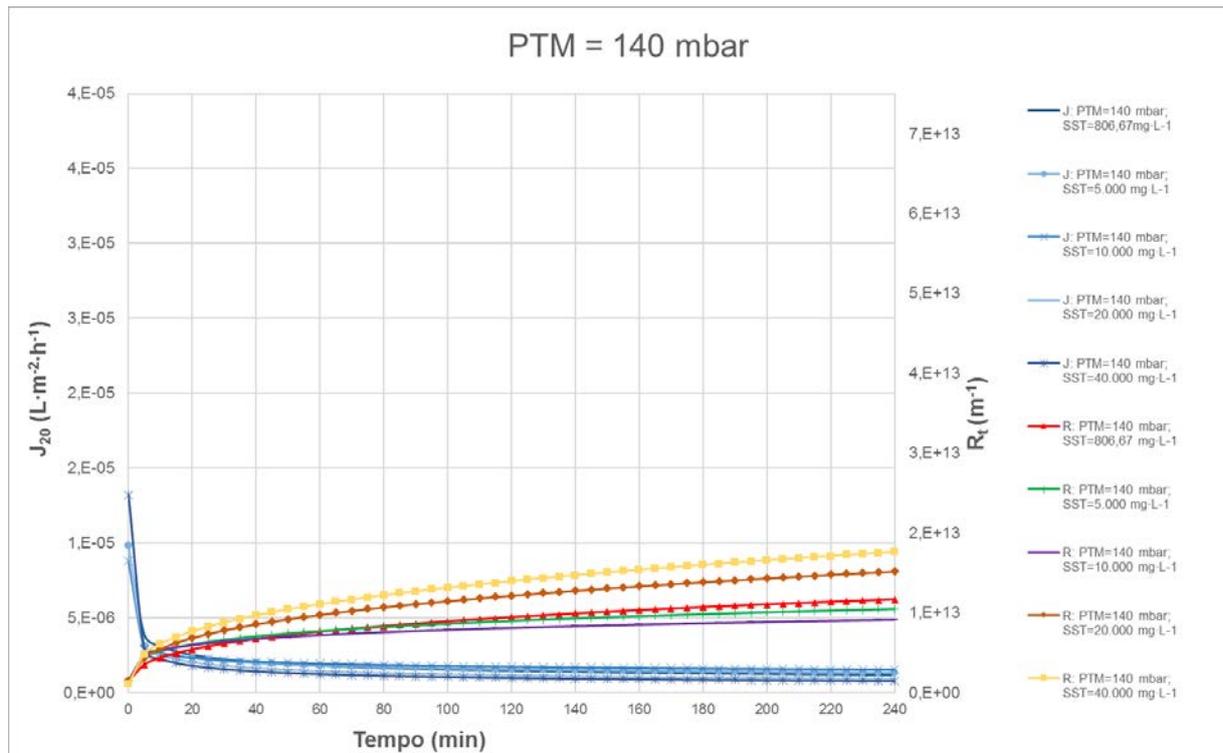


Figura 8: Comportamento de R_T e J a 20°C para as condições de pressão de 140 mbar e concentrações de 806,67, 5.000, 10.000, 20.000 e 40.000 $\text{mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$.

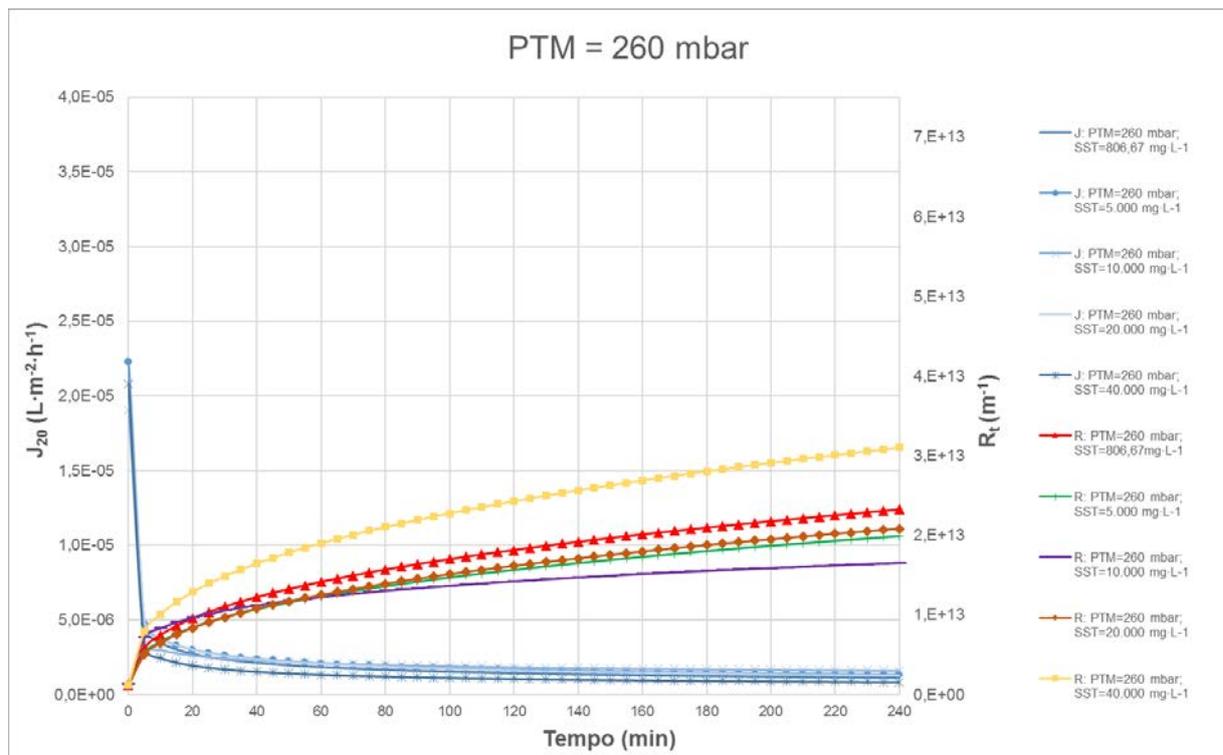


Figura 9: Comportamento de R_T e J a 20°C para as condições de pressão de 260 mbar e concentrações de 806,67, 5.000, 10.000, 20.000 e 40.000 $\text{mg SST} \cdot \text{L}^{-1}$.

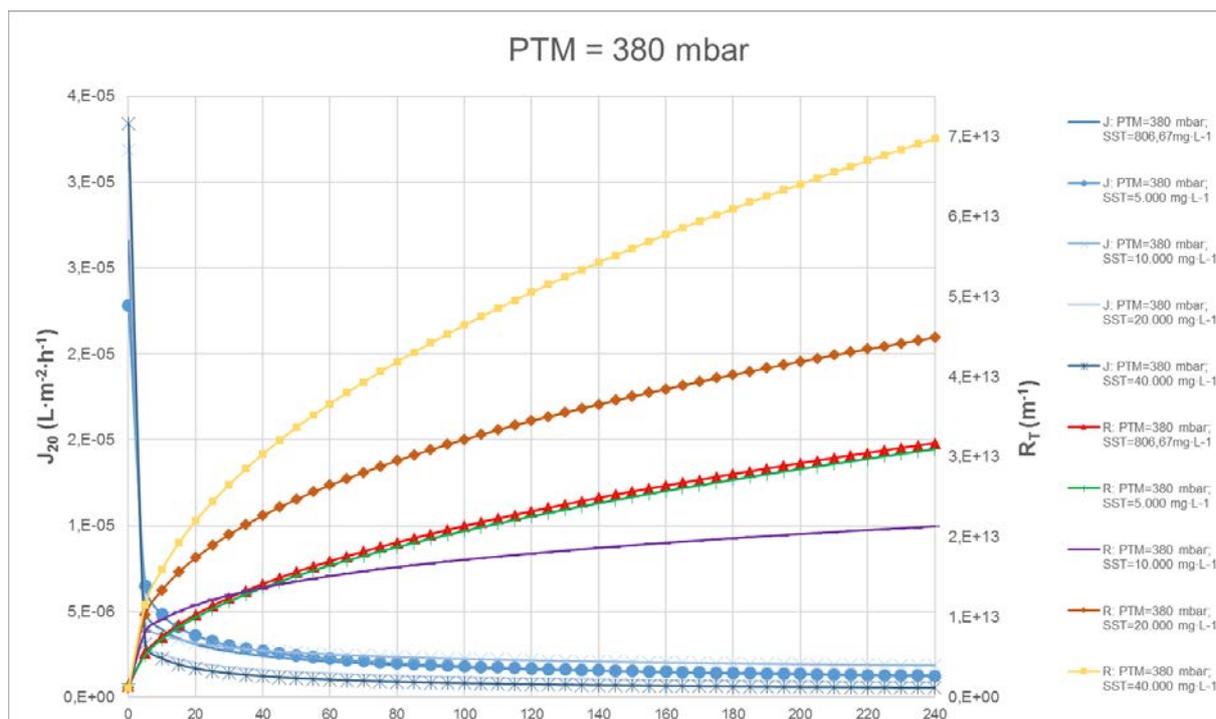


Figura 10: Comportamento de R_T e J a 20°C para as condições de pressão de 380 mbar e concentrações de 806,67, 5.000, 10.000, 20.000 e 40.000 mg SST $\cdot\text{L}^{-1}$.

RESISTÊNCIA DECORRENTE DO FOULING E AS RESISTÊNCIAS EM SÉRIE

Na segunda etapa do ensaio de filtração, realizada com água destilada durante 2 h sem que a membrana sofresse qualquer tipo de limpeza, buscou-se obter dados para melhor compreensão da resistência decorrente dos fenômenos de *fouling*. Efetuou-se o tratamento do conjunto de dados de resistência ao longo do tempo, desconsiderando os *outliers*, ou seja, pontos maiores do que a média acrescida de três vezes o desvio padrão da amostra e pontos menores do que a média diminuída de três vezes o desvio padrão.

Este conjunto de dados foi comparado com a resistência intrínseca da membrana e com o último valor de resistência total registrado na primeira etapa do ensaio de filtração. Já que para o tempo de filtração realizado, os valores finais de resistência total apresentavam aumento percentual muito baixo, considera-se que o último valor de R_T é o mais próximo do valor final que a membrana irá atingir. Este comparativo está representado graficamente na Figura 11. O conjunto de dados de resistência devido ao *fouling* representa o valor médio de cada conjunto de dados (ponto central) e também o desvio padrão de cada ensaio.

Durante o experimento, observou-se que a torta estabelecida, diferentemente daquela observada em processos anaeróbios similares, não estava completamente aderida na superfície da membrana. Devido a essa característica, na transição da etapa 1 e 2 observou-se perda de material na forma de placas, em menor ou maior grau, em alguns dos ensaios. Na Figura 11, as setas indicam dois pontos de dados cuja análise é inviável, devido a esse tipo de interferência durante o procedimento experimental.

De acordo com o modelo das resistências em série, a resistência total pode ser desmembrada em vários componentes. Os mais comumente citados são resistência intrínseca da membrana (R_M), a resistência devido ao *fouling* (R_F) e a resistência pela polarização da concentração (R_{CP}), compondo a resistência total (R_T). Sendo assim, a diferença entre a R_T e a R_F evidenciada na Figura 11 representa a resistência da polarização da concentração, que se manifesta enquanto há pressão estabelecida no sistema. Neste caso, considerando o desvio padrão da R_F , pode-se dizer que, para as condições testadas, a resistência devido ao *fouling* é mais relevante do que a resistência relacionada à polarização da concentração.

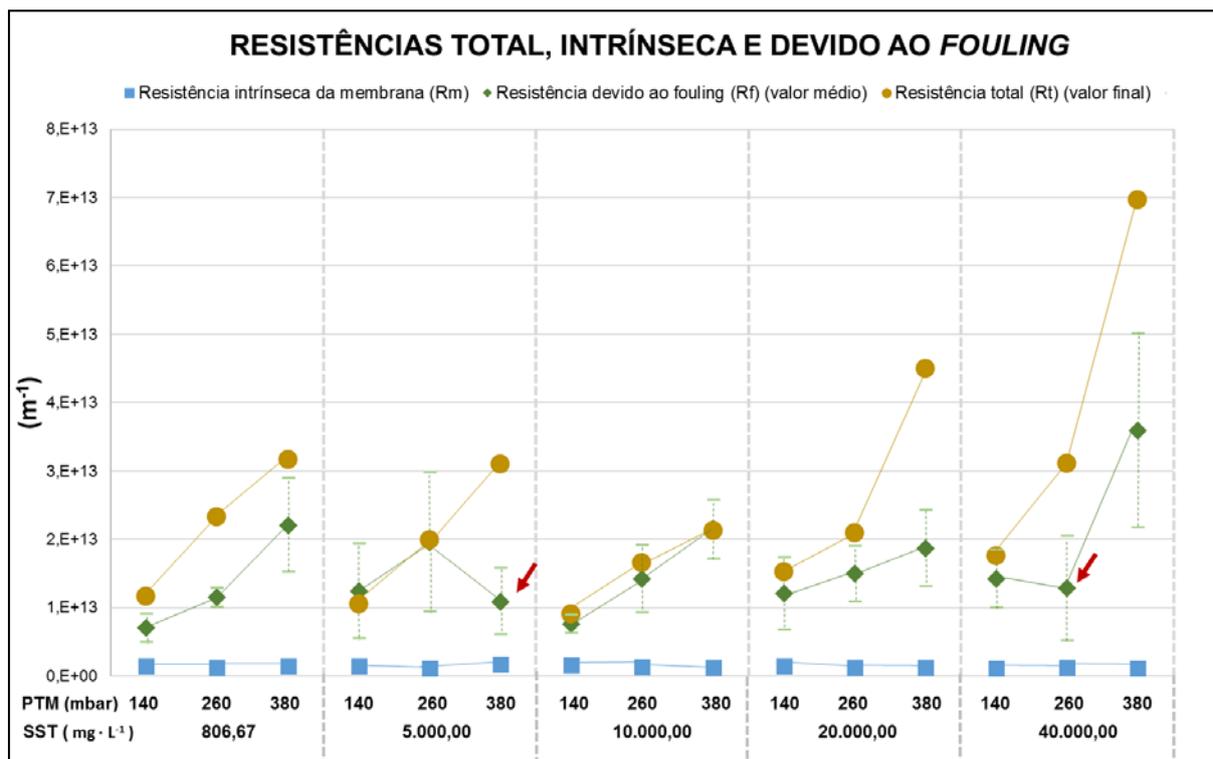


Figura 11: Dados experimentais referentes às resistências total, devido ao *fouling* e intrínseca da membrana para cada conjunto concentração de SST e pressão transmembrana testados.

Outro aspecto importante evidenciado pelos dados da Figura 11 é, novamente, a relação entre a distribuição granulométrica das soluções e as resistências desenvolvidas durante o ensaio. O efluente puro, com concentração de 806,67 mg SST·L⁻¹, com diâmetro médio de partícula menor, foi a solução na qual a R_{CP} foi mais expressiva, sugerindo o estabelecimento da camada limite de forma consistente e proporcional à pressão transmembrana aplicada.

Com diâmetro mediano de partícula bastante semelhantes entre si, as soluções correspondentes às concentrações de 5.000, 10.000 e 20.000 mg SST·L⁻¹ desenvolveram resistência relacionada ao *fouling* bastante similares. Por outro lado, o aumento da concentração é o resultado da introdução de lodo anaeróbio granular na solução, o que prejudicou a homogeneidade da curva granulométrica para as soluções com concentração maior do que 806,67 mg SST·L⁻¹. Isso é evidenciado pela diferença entre o diâmetro médio e o diâmetro mediano de cada solução.

A presença de material granular teve um comportamento bastante particular no que se refere ao desenvolvimento da camada limite e dos fenômenos envolvidos, especialmente a polarização da concentração. Na região externa das fibras do módulo de membranas, exposta à turbulência relacionada à agitação constante, os grânulos atuaram como agentes de limpeza mecânica. O trabalho de Aslam et al. (2017) aborda o uso desse tipo de agentes, que são constituídos por materiais granulares, tais como carvão ativado granular ou em pó, e são adicionados à solução de alimentação a ser filtrada. Como principal benefício, os autores identificam a possibilidade de o agente mecânico ser capaz de efetivamente atingir a superfície da membrana, diferentemente da turbulência hidrodinâmica ou bolhas de ar, que são limitadas pela camada limite laminar. O que se observa nas concentrações intermediárias é justamente a resistência de polarização da concentração praticamente inexistente, e a manutenção da resistência total para três concentrações bastante distintas: 5.000, 10.000 e 20.000 mg SST·L⁻¹.

A última solução testada, com concentração de SST equivalente a 40.000 mg SST·L⁻¹, apresentou predominância de partículas de maior diâmetro com origem do lodo granular evidenciada pela relação entre o diâmetro médio e mediano, neste caso bastante próximos. Neste caso, devido à concentração alta, a agitação foi menos eficiente e, assim, os grânulos atuaram em menor grau na limpeza mecânica da membrana. O que se

observou foi o aumento significativo da resistência total em relação aos demais ensaios, acentuado na maior pressão. Esse aumento foi observado já na pressão de 380 mbar da concentração imediatamente inferior, equivalente a 20.000 mg SST·L⁻¹.

CONCLUSÕES

Um dos fenômenos comuns nos processos com membranas é o declínio do fluxo de permeado com o tempo, devido ao aumento das parcelas que compõem a resistência total da membrana. Para efluentes e processos de tratamento anaeróbios, no entanto, esta relação ainda é pouco conhecida.

Avaliando os resultados em termos de fluxo de permeado para cada concentração de sólidos suspensos totais nas três pressões ensaiadas, pode-se observar que a curva do fluxo é praticamente idêntica. Ainda, os valores obtidos para o parâmetro fluxo de permeado também não apresentaram variações significativas entre as condições ensaiadas. Isso significa que, para o caso do efluente anaeróbio testado, o fluxo de permeado não é controlado pela pressão estabelecida no sistema de filtração ou mesmo pela concentração de sólidos suspensos na solução de filtração, e sim pelas resistências associadas à membrana.

Quanto às resistências, no escopo da metodologia aplicada, as características físicas das soluções testadas relacionadas à granulometria sugerem maior interferência do que a concentração de sólidos suspensos totais. A distribuição granulométrica das amostras utilizadas, portanto, se associa a um padrão de comportamento de fluxo cuja correlação deverá ser verificada de forma mais aprofundada.

Para esta condição de efluente, do ponto de vista econômico e energético, os resultados obtidos permitem concluir que a pressão de sucção de 140 mbar é capaz de atingir volumes de permeado muito próximos ao da maior pressão testada com menor demanda energética, sendo, portanto, a mais adequada para quaisquer uma das concentrações testadas.

Mais importante do que particularidades relacionadas à operação das membranas, este estudo serve de apoio a projetos de associação de biorreatores anaeróbios a membranas submersas. As altas concentrações testadas evidenciam que a tecnologia de membranas não é uma alternativa limitadora em relação a incrementos no arraste de sólidos do reator decorrentes de ajustes no tempo de detenção hidráulico e tempo de retenção celular, visando otimizar a degradação da matéria orgânica e a produção de biogás ou ainda, aumentar o volume tratado em um reator já estabelecido.

Ainda que se faça necessário a ampliação destas pesquisas para outras situações de escala, de pressões e de concentrações de sólidos, a partir destes resultados já é possível inferir que há a necessidade de reverem-se parâmetros de projeto relacionados ao dimensionamento de plantas de tratamento que contemplem este tipo de tecnologia e processos em escala real. O foco em manter pressões constantes e baixas configura-se como um diretriz de projeto a ser considerada, como forma de otimizar o processo de tratamento, associado a um menor consumo de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AN, Y. Y., YANG, F., BUCCIALI, B., WONG, F.. Municipal wastewater treatment using a UASB coupled with cross-flow membrane filtration. *Journal of Environmental Engineering*, v. 135, p. 86-91, 2009.
2. ASLAM, Muhammad, SHARFI, Amine, LESAGE, Geoffroy, HERAN, Marc, KIM, Jeonghwan, Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling, *Chemical Engineering Journal*, v. 307, p. 897-913.2017.
3. AWWA (American Water Works Association. *Water Treatment Membrane Processes*. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1996. p. 17.1-17.13.
4. CHANG, I., LE CLECH, P., JEFFERSON, B., JUDD, S.. Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, v. 128(11), p. 1018-1029. 2002.
5. CHEN, Cheng, GUO, Wenshan, NGO, Huu Hao, LEE, Duu-Jong, TUNG Kuo-Lun, JIN Pengkang, WANG Jie, WU Yun. Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors, *Renewable Energy*, v. 98, p. 120-134, 2016.

6. CHERYAN, M.. Ultrafiltration and microfiltration: handbook. Lancaster, 1998.
7. GOUVEIA, J., PLAZA, F., GARRALON, G., FDZ-POLANCO, F., PEÑA, M.. Long-term operation of a pilot scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for the treatment of municipal wastewater under psychrophilic conditions. *Bioresource Technology*, v. 185, p. 225-233, 2015.
8. HUANG, Z., ONG, S. L., NG, H. Y.. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: Effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling. *Water Research*, v. 45, p. 705-713, 2011.
9. KRZEMINSKI, P., LEVERETTE, L., MALAMIS, S., KATSOU, E.. Membrane bioractors – A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects. *Journal of Membrane Science*, v. 527, p. 207-227, 2017.
10. Lin, H., Peng, W., Zhang, M., Chen, J., Hong., H., Zhang, Y.. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*, v. 314, p. 169-188. 2013.
11. MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G.. Review on research achievements of biogas for anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540-555. 2015.
12. MENG, F., ZHANG, S., OH, Y., ZHOU, Z., SHIN, H., CHAE, S.. Fouling in membrane bioreactors: an updated review. *Water Research*, v. 114, p. 115-180, 2017.
13. OZGUN, H., GIMENEZ, J.B., ERSAHIN, M. E., TAO, Y., SPANJERS, H., LIER, J. B. van. Impact of membrane addition for effluent extraction on the performance and sludge characteristics of upflow anaerobic sludge blanket reactors treating municipal wastewater. *Journal of Membrane Science*, v. 479, p. 95-104, 2015.
14. PELÁEZ, M. L. S., SAGASTUME, J. M. M., NOYOLA, A.. Influence of hydraulic retention time on fouling in a UASB coupled with an external ultrafiltration membrane treating synthetic municipal wastewater. *Desalination*, v. 277, p.164-170, 2011.
15. SKOUTERIS, G., HERMOSILLA, D., LÓPEZ, P., NEGRO, C., BLANCO, Á. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, V 198-199, p. 138-148. 2012.
16. SOMBATSOMPOP, K.; VISVANATHAN, C., AIM, R. B. Evaluation of biofouling phenomenon in suspended and attached growth membrane bioreactor systems. *Desalination*, v . 201, p.138-149. 2006.