

II-433 - DINÂMICA DE SÓLIDOS EM SISTEMAS MBBR EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE RECHEIO E VAZÃO: ESTUDO EM ESCALA PILOTO E LABORATORIAL

Diego Luiz Fonseca⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Poli/UFRJ e Engenheiro Hidráulico pela ENSEEIHT/França. Mestre em Engenharia Química pela Coppe/UFRJ. Professor Substituto em Saneamento Ambiental na Poli/UFRJ.

João Paulo Bassin⁽²⁾

Engenheiro Químico pela UFSC. Mestre em Engenharia Química pela Coppe/UFRJ e Doutor em Biotecnologia Ambiental pela TU Delft/Holanda. Professor do Programa de Engenharia Química da Coppe/UFRJ.

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Sala I-100 – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-909 - Brasil - Tel: +55 (21) 3938-8811 - e-mail: diegol Luiz@poli.ufrj.br

RESUMO

Avaliou-se o desempenho de sistemas MBBR sujeitos a variações tanto na fração de recheio quanto na vazão afluente em relação à dinâmica de sólidos nos biorreatores. Para tanto, foram construídos e operados dois reatores, comparando-se os resultados obtidos nas diferentes escalas: um piloto (920 L), tratando esgoto sanitário real, e outro em escala de bancada (1 L), alimentado com afluente sintético. Em paralelo, diversos métodos de quantificação de sólidos aderidos foram aplicados a dois suportes comerciais de dimensões distintas, preenchendo a lacuna ainda existente na literatura quanto à padronização e limitações de cada metodologia. As técnicas testadas levaram a resultados distintos, com o método por pesagem direta descontando o valor do suporte limpo mostrando-se mais indicado para a quantificação dos sólidos aderidos totais. A fração de recheio (FR) pareceu ser o parâmetro de maior influência sobre o armazenamento de biomassa por suporte, havendo aumento desta na passagem de 70 para 50% de recheio em ambos os reatores. O padrão de crescimento da biomassa em resposta à carga orgânica afluente também foi mediado pela FR. No sistema de bancada, a movimentação dos suportes foi deficitária e houve produção excessiva de EPS, sobretudo nos altos valores de recheio e carga afluente, prejudicando o funcionamento do reator. Além de superior ao preconizado por norma brasileira (NBR 12.209/2011), o armazenamento de biomassa por metro quadrado de suporte indicado pelo fabricante mostrou-se acima do obtido nas condições operacionais testadas.

PALAVRAS-CHAVE: MBBR, sólidos aderidos, fração de recheio, dinâmica de sólidos, quantificação de sólidos.

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento e densificação de muitas cidades tornam imperativa a busca por soluções eficientes e compactas para o tratamento de efluentes, que sejam de fácil adaptação a estações existentes e respondam a evoluções da legislação ambiental, não só de abatimento da carga orgânica, como também de nutrientes, como o nitrogênio amoniacal. Nessa concepção, o emprego de reatores de leito móvel com biofilme (MBBR) ganha cada vez mais destaque, permitindo flexibilidade operacional e boa qualidade do efluente final. Concebido ao final dos anos 80 como parte da estratégia norueguesa de tratamento de efluentes por meio de soluções econômicas, compactas e de elevada eficiência, alia as melhores características do clássico processo de lodos ativados com o emprego de crescimento bacteriano imobilizado, descartando inconvenientes, tais como reciclo de lodo, entupimentos e falhas mecânicas (RUSTEN *et al.*, 2006).

Seu funcionamento geral é baseado na introdução de suportes móveis (biomédias) de elevada área específica (m^2/m^3) no tanque de aeração, favorecendo o crescimento de biomassa aderida e sua manutenção no reator (RUSTEN *et al.*, 1995b). Dentre as vantagens da tecnologia MBBR, destacam-se o aumento da concentração de biomassa sem sobrecarga dos decantadores, a retenção de bactérias de crescimento lento, como as nitrificantes, menor requisito de área e operação estável e maior robustez frente a choques de carga (MARTÍN-PASCUAL *et al.*, 2012; RUSTEN *et al.*, 1995a).

Grandes nichos de aplicação desta tecnologia encontram-se na melhoria do desempenho nitrificante e no aumento de carga e atualização (*retrofit*) de ETEs já saturadas e com pouca área disponível para ampliação. Embora venha se consolidando como um sucesso comercial, com centenas de plantas de grande porte ao redor do mundo e inúmeras aplicações industriais (RUSTEN *et al.*, 2006), o emprego da tecnologia MBBR em estações municipais brasileiras ainda é restrito, havendo apenas seis estações utilizando tal tecnologia até o início de 2016 (ANA & MCIDADES, 2016; GRUPO ÁGUAS DO BRASIL, 2016).

Um dos principais parâmetros operacionais em sistemas em MBBR é a fração de recheio (FR) (ou de enchimento), definida como a razão do volume empolado ocupado pelas biomédias, consideradas como blocos sólidos, e o volume total do reator (OLIVEIRA, 2008). Em termos brasileiros, a NBR 12.209/2011 admite como MBBR sistemas com FR entre 30 e 70% (ABNT, 2011). Esse mesmo limite máximo de enchimento também é preconizado na literatura internacional (RUSTEN *et al.*, 2006).

A maioria dos estudos relacionados a sistemas MBBR adota uma dada FR e avalia o desempenho do reator, frente a variações de carga, TDH, remoção de poluentes específicos entre outras configurações operacionais, sendo poucos os trabalhos que exploraram o impacto de variações da FR no funcionamento e nas características do sistema. Além disso, em geral, o impacto da mudança da FR na eficiência do reator é estudado de forma isolada, dificilmente considerando a alteração combinada da fração de enchimento com outros parâmetros operacionais.

Assim como em qualquer reator biológico, a concentração de biomassa em sistemas MBBR é um parâmetro fundamental, com reflexos diretos no desempenho do reator, estimação de parâmetros cinéticos, projeto, controle e modelagem dos processos. Além dos sólidos em suspensão, a fração majoritária da biomassa encontra-se aderida aos suportes plásticos e, portanto, é fundamental sua consideração e correta mensuração.

Embora os primeiros trabalhos sobre a tecnologia MBBR se apoiassem no fato de que a concentração de biomassa poderia ser aumentada com o incremento da fração de recheio (RUSTEN *et al.*, 1995b), parece ainda não haver consenso na literatura quanto ao impacto das condições de enchimento na dinâmica e características da biomassa. WANG *et al.* (2005) constataram diminuição da concentração da biomassa em suspensão com o aumento do recheio, sendo a fração aderida predominante após 20% e apresentando máxima concentração a 50%. Já em outro estudo, tal concentração máxima ocorreu na FR de 35% (LOPEZ-LOPEZ *et al.*, 2012).

Além disso, a comparação de resultados de diferentes estudos é prejudicada pela ausência de normatização das técnicas de quantificação da biomassa aderida aos suportes, principal fração encontrada nos sistemas MBBR. Os distintos métodos aplicados levam muitas vezes a resultados diferentes (JORDÃO & PESSÔA, 2011), podendo sub ou sobrestimar a biomassa, além de determinadas metodologias apresentarem desempenho atrelado à forma ou material do suporte analisado.

Se em reatores com biomassa em suspensão como o Lodos Ativados, técnicas de quantificação de sólidos (totais, dissolvidos e em suspensão) encontram-se bastante difundidas e padronizadas (APHA, 2005), são diversos os métodos e formas para extração, quantificação e notação de sólidos aderidos em sistemas MBBR puros. O mais comum na determinação da biomassa aderida são técnicas baseadas na remoção do biofilme do meio suporte antes de sua quantificação (DONLAN & COSTERTON, 2002). Mesmo para uma dada força motriz de separação do biofilme do meio suporte, são diversas as variações quanto ao tempo de exposição à força motriz, quantidade de biomédias, eventual concentração e volume de produto químico, entre outras.

Mesmo sendo clara a importância da metodologia de quantificação da biomassa aderida na qualidade dos dados obtidos, é comum não encontrar relatos na literatura sobre a metodologia empregada para sua quantificação de maneira geral (DUAN *et al.*, 2013) ou, na maioria das vezes, especificamente sobre o método usado na separação do biofilme do meio suporte (PLATTES *et al.*, 2006; RUSTEN *et al.*, 1995a). Já quando o método utilizado é explicitado, de fato, variadas são as técnicas empregadas na literatura. Percebe-se que diversos são as técnicas que se apoiam na extração do biofilme para sua quantificação. Em alguns, forças mecânicas são usadas, como ultrassom, agitação ou raspagem manual (MAHENDRAN *et al.*, 2012). Já outros utilizam agentes químicos, tais como ácido sulfúrico ou hidróxido de sódio para viabilizar a limpeza do suporte (LEVSTEK & PLAZL, 2009). Alguns métodos analisam diretamente o caldo da extração (contendo biofilme e o meio utilizado – água destilada, ácido, base etc.) (WANG *et al.*, 2005), enquanto outros se baseiam na diferença entre a massa da biomédia antes e depois da extração (MARTÍN-PASCUAL *et al.*, 2012).

Como forma de agilizar o último processo, alguns autores preferem contabilizar apenas a massa seca da biomídia antes da extração, descontando desta o valor teórico da massa de uma biomídia limpa (LEVSTEK & PLAZL, 2009).

Somado às diferenças relativas aos métodos de extração, é comum encontrar na literatura resultados para sólidos aderidos expressos de formas distintas, tais como sólidos totais aderidos, sólidos em suspensão aderidos (resíduos totais não filtráveis do produto da extração do biofilme) e sólidos em suspensão voláteis. Tais notações comprometem a comparação entre resultados oriundos de metodologias distintas, visto que alguns métodos não possibilitam a filtração do produto da extração do biofilme, já que não contemplam a remoção da biomassa do meio suporte ou provocam lise celular, por exemplo.

Considerando todos os fatores apresentados, este trabalho objetivou estudar o impacto de diferentes condições operacionais em relação ao par fração de recheio e vazão afluyente (por conseguinte, do tempo de detenção hidráulica) na dinâmica da biomassa (em suspensão e aderida) em sistemas MBBR, tanto em escala piloto quanto laboratorial, de modo a evidenciar possíveis diferenças nos resultados obtidos nas duas escalas. Ainda, como forma de aproximar o estudo à realidade brasileira, empregou-se um suporte plástico de fabricação nacional, já utilizado em algumas estações municipais.

Além disso, com base nas dificuldades enfrentadas para a quantificação de sólidos aderidos aos suportes e a carência de normatização a respeito, realizou-se também um estudo comparativo entre diversas metodologias de extração e quantificação dessa fração da biomassa, buscando-se elucidar os métodos mais adaptados e obter maior confiabilidade nas análises de sólidos aderidos realizadas. De modo a verificar se o sucesso de cada técnica era dependente da forma da biomídia utilizada, os diversos métodos testados foram aplicados a dois suportes plásticos de dimensões distintas.

METODOLOGIA - MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS ADERIDOS

Devido à falta de normatização para a quantificação dos sólidos aderidos totais (SAT) e voláteis (SAV), procedeu-se inicialmente a uma análise comparativa de diversas metodologias, dentre as quatro categorias mais reportadas na literatura científica para a extração/quantificação de sólidos aderidos: manual; com uso de ultrassom; por meio de solução de NaOH 1 mol/L; e por pesagem direta do elemento plástico. Combinações e variantes desses métodos foram também empregadas.

Para a extração manual (doravante denominada MM), os sólidos aderidos foram removidos de três biomídias apenas com uso de uma espátula e de água destilada. Já na metodologia de remoção por ultrassom (UM), três biomídias foram colocadas em tubo *falcon* de 50 mL contendo 10 mL de água destilada e imerso em banho de ultrassom aquecido (50°C). Três variantes foram testadas: 30 min de ultrassom (UM1) e 15 (UM2) ou 30 min (UM3) de ultrassom com agitação manual dos tubos a cada cinco minutos. Nessas duas últimas (UM2 e 3), posteriormente ao ultrassom, os sólidos ainda aderidos às biomídias foram também extraídos com auxílio de uma espátula e uma *pissette* de água destilada, enquanto que na variante UM1, apenas água destilada foi usada.

Outro método (NaOHM) consistiu na adição de 10 mL de solução NaOH 1 mol/L a um tubo *falcon* de 50 mL contendo três biomídias. O tubo foi colocado em banho-maria por 15 min, sendo agitado a cada cinco minutos. Como o caldo resultante da extração continha não só os sólidos extraídos, mas também o NaOH utilizado, duas técnicas foram empregadas: uso de branco contendo apenas 10 mL da mesma solução de NaOH 1M (NaOHM1) e centrifugação, remoção do sobrenadante e ressuspensão do precipitado em água destilada (repetido três vezes), de modo a remover o NaOH dissolvido no líquido resultante da extração (NaOHM2).

Já a pesagem direta da biomídia coletada foi realizada após sua secagem em estufa a 105 °C por 24 h. Em seguida, o biofilme seco foi removido por jatos de água e uso de solução de NaOH 1M em banho-maria. As biomídias foram então lavadas exaustivamente e secas novamente em estufa por 24h, sendo a massa da biomídia limpa e seca descontada do valor previamente medido (PDM1). Uma variante desse método baseou-se em descontar da massa da biomídia com biofilme seco o valor médio da massa de uma biomídia seca e limpa, calculado previamente a partir de um grupo de 25 biomídias (PDM2), numa tentativa de simplificar e agilizar a variante PDM1.

À exceção do PDM, em que a extração é posterior à pesagem, para os demais métodos, os sólidos aderidos totais e sua porção volátil foram quantificados através da pesagem do material da extração após secagem por 24 h em cadinho de cerâmica pré-pesado em estufa a 105° C (sólidos aderidos totais) e após uma hora em mufla a 550° C (sólidos aderidos voláteis), como usualmente aplicado para a quantificação de sólidos (APHA, 2005). Para o PDM, a porção volátil não pode ser obtida, já que as biomédias não permaneceriam íntegras a tal temperatura (550° C).

Admitindo-se que as células microbianas estão fortemente aderidas à matriz polimérica e que apenas a filtração não permitiria sua segregação, além de ser inviável nos métodos NaOH (lise celular) e PDM (sem extração do biofilme), considerou-se como biomassa aderida todo teor de SAV obtido. Já para a biomassa em suspensão, considerou-se o valor de SSV, como tradicionalmente empregado na literatura. A biomassa total no sistema foi entendida como equivalente aos sólidos voláteis totais, representados pela soma de SAV e SSV, apesar do inconveniente do primeiro não ser filtrado e o segundo sim.

De modo a avaliar se a eficiência de cada técnica era dependente da forma da biomédia, o conjunto de métodos descritos foi aplicado em suportes plásticos do tipo K1 (AnoxKaldnes) e MOD940 (Ambio). O primeiro é um suporte amplamente empregado em escala comercial, de 500 m²/m³ e apenas 7 mm de altura e 10 mm de diâmetro. Já o segundo, encontra-se melhor descrito na seção a seguir.

METODOLOGIA - REATORES & CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Foram montados e operados dois sistemas MBBR: um reator em escala piloto de volume útil de 920 L e um reator em escala de bancada de 1L, ambos atuando como MBBR puros, sem reciclo de lodo.

O sistema MBBR piloto foi alimentado com esgoto sanitário coletado no campus Cidade Universitária da UFRJ, com vazão controlada por meio de bomba de deslocamento positivo (NEMO, NETZSCH), e um inversor de frequência (CFW08, WEG). Devido à baixa carga orgânica afluyente à estação, como constatado em trabalho pretérito (ALMADA, 2012) e no monitoramento anterior ao início da operação, optou-se por conectar o reator logo em seguida ao tratamento preliminar, excluindo o uso de decantadores primários prévios ao reator biológico em questão, como admitido pela NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011). O esgoto afluyente ao reator entrava em descarga livre diretamente em um defletor, instalado na borda do reator, com saída ao fundo, ao passo que o efluente saía por cima por meio de tubulação com gradeamento acoplado, de modo a evitar a saída dos meios plásticos do reator (Figura 1, esquerda). A aeração era feita por dois difusores de bolha grossa da marca MBBR BioReatores LTDA, instalados no fundo do reator, sendo a vazão de ar controlada por um compressor, instalado ao lado do reator e dotado de um registro de esfera para controle manual do fluxo de ar que adentrava ao reator. Manteve-se o oxigênio dissolvido (OD) no reator, em geral, próximo a 3,0 mg/L, de modo a permitir o desenvolvimento dos processos de oxidação aeróbia da matéria orgânica e de nitrificação, bem como manter a espessura do biofilme controlada através da turbulência causada pelo fluxo de ar associado a tais valores de OD (JORDÃO & PESSÔA, 2011; RUSTEN *et al.*, 2006). O OD era monitorado regularmente com uso de oxímetro portátil (marca YSI).

Já o sistema MBBR de bancada operou em condições controladas em laboratório, sendo alimentado com efluente sintético, isento de sólidos em suspensão, composto por: glicose (simulando DQO de 400 mg/L), cloreto de amônio (nitrogênio amoniacal de 35 mgN/L), cloreto de sódio (cloretos de 300 mg/L), bicarbonato de sódio (fonte de alcalinidade e carbono inorgânico, com pH em torno de 8), fosfatos de potássio monobásico e dibásico (fósforo e tampão), água da torneira e solução com micronutrientes essenciais ao crescimento da microbiota responsável pelo tratamento biológico (VISHNIAC; SANTER, 1957 apud BASSIN, 2012). O objetivo foi simular um cenário com concentrações dos poluentes afluentes invariáveis ao longo do tempo, condição obviamente não atingida na planta piloto alimentada com esgoto real. As instalações hidráulicas do sistema de bancada foram feitas com mangueiras flexíveis de silicone, sendo a vazão controlada por bomba peristáltica dosadora (323, Watson-Marlow) (Figura 1, direita). Todas as mangueiras, bem como o recipiente de armazenamento do efluente sintético, eram limpos duas vezes por semana, evitando a proliferação de material biológico, o que poderia comprometer as características do efluente ou alterar a vazão (em função de entupimentos). A saída do reator era conectada diretamente à pia por tubulação de diâmetro inferior às biomédias utilizadas, garantindo a permanência destas no reator e o afluyente adentrava por gotejamento na parte superior da extremidade oposta à saída. A aeração era feita com auxílio de duas linhas de ar comprimido

com saídas na base do reator, uma em cada extremidade, promovendo tanto a movimentação do meio suporte quanto o fornecimento de OD. Como as biomédias eram de grande dimensão se comparadas ao tamanho do reator, era necessária uma vazão maior de ar para mantê-las em movimento, o que favoreceu altos valores de OD, em média em torno de 6,0 mg/L. Já a temperatura do reator manteve-se em torno de 23°C.

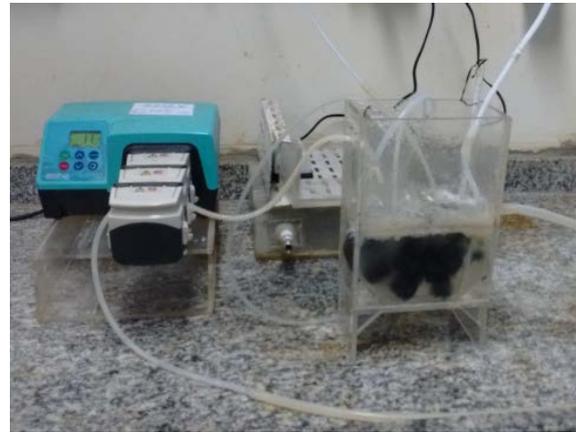


Figura 1: Reator piloto e as instalações hidráulicas afluentes e efluentes (esquerda) e vista frontal do reator de bancada, alimentado por bomba dosadora (direita). Fonte: Arquivo Pessoal.

Em ambos os reatores, utilizou-se o meio suporte cilíndrico não poroso modelo MOD940, da empresa AMBIO Engenharia LTDA (Figura 2), cujas informações indicadas pelo fabricante estão agrupadas na Tabela 1. O crescimento de biofilme nos suportes plásticos do reator piloto foi acelerado com a adição de lodo proveniente de uma ETE municipal do tipo lodos ativados, com o reator operando em batelada por duas semanas. Já no reator de bancada, utilizaram-se suportes já colonizados, advindos do reator piloto em operação.



Figura 2: Biomédia MOD940, da AMBIO, já com biofilme desenvolvido em sua área interna. Fonte: Arquivo Pessoal.

Tabela 1: Características da biomédia utilizada. Fonte: AMBIO, s.d.

Material	Altura	Diâmetro	Área da Peça
Polipropileno ou Polietileno de Alta densidade	25 mm	25 mm	0,01248 m ²
	Peças por m ³	Área específica real	Armazenamento de Biomassa
	55.000	687 m ² /m ³	20,0 gSST/m ²

Variando-se tanto a fração de recheio quanto o TDH, foram testadas nove condições operacionais distintas no reator piloto, ao longo de 361 dias de operação, e seis condições no reator de bancada, durante 177 dias. Cada condição é identificada ao longo do trabalho pelo valor da fração de recheio, seguido do TDH (ex. 70%, 1,5h). As análises laboratoriais seguiram o preconizado por APHA (2005), com coletas compostas no reator piloto ao longo de cinco a seis horas e coletas simples no reator de bancada, dada a homogeneidade do afluente. A frequência de testes para os sólidos aderidos aos suportes plásticos foi semanal no reator piloto e uma vez por regime no reator de bancada, visto tanto a maior uniformidade da alimentação deste reator quanto sua restrição em relação ao número de biomédias presentes. Para o monitoramento dos sólidos aderidos, adotaram-se os métodos de melhor desempenho, segundo a análise comparativa realizada inicialmente.

RESULTADOS & DISCUSSÃO

MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SÓLIDOS ADERIDOS

Face à importância da quantificação da biomassa imobilizada em suportes de sistemas MBBR, a pesquisa teve início objetivando comparar diversas metodologias para tal finalidade. A Figura 3 mostra os resultados obtidos para os oito métodos testados em termos de sólidos aderidos totais (SAT) e de proporção de voláteis (SAV/SAT), com os respectivos erros padrão associados, para os dois suportes testados, K1 (Figura 3 - esquerda) e MOD940 (Figura 3 - direita).

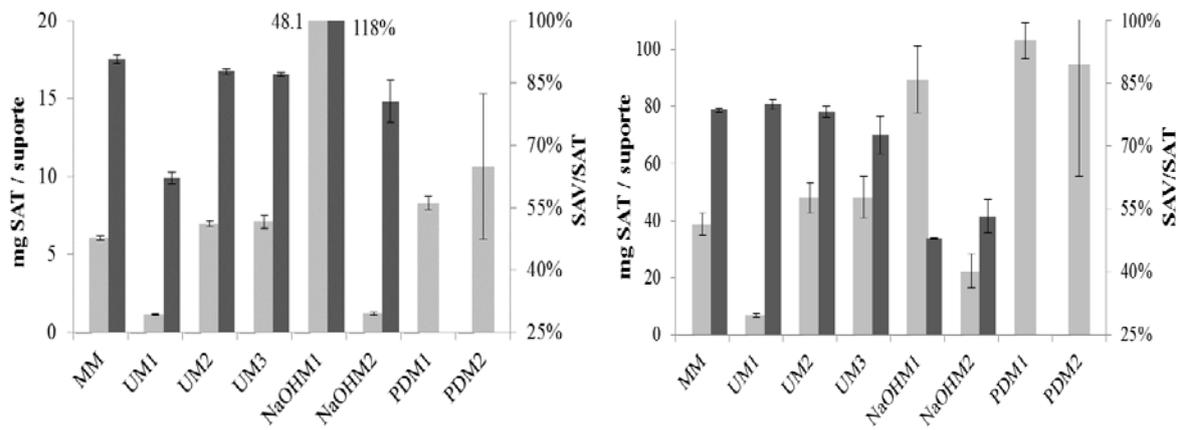


Figura 3: Sólidos aderidos totais (SAT) por suporte (cinza) e proporção de voláteis (SAV/SAT - preto) para cada método testado com o suporte K1 (esquerda) e MOD940 (direita). Barras verticais indicam o erro padrão. A escala dos eixos verticais na figura à esquerda foi ajustada para uma melhor visualização, omitindo os valores associados ao método NaOHM1, cujos valores encontram-se explicitados na figura.

O PDM1 (pesagem direta descontado a massa da biomídia limpa) teve bom desempenho, sendo de simples execução, permitindo uma melhor limpeza das biomídias, baixos erros e ausência de inconvenientes operacionais relacionados em ambos os suportes testados. Entretanto, um inconveniente do PDM1 é a impossibilidade de seu uso para caracterizar os teores de SAV ou SST e SSV equivalente, haja vista a impossibilidade de levar os suportes diretamente à mufla e por não haver extração prévia à pesagem. Já o PDM2 (pesagem direta descontado a massa teórica da biomídia), apesar de apresentar média próxima aos valores do PDM1, teve erros elevados associados. As pequenas diferenças de massa de um suporte a outro prejudicaram a repetibilidade do método, de modo que um numeroso conjunto de biomídias deve ser analisado para que a média seja de fato significativa, a despeito do erro substancial.

Em termos de sólidos aderidos totais por suporte, o MM (extração manual), UM2 e o UM3 (extração por ultrassom seguido de raspagem manual) apresentaram valores similares, ao passo que o UM1 (extração por ultrassom sem agitação ou raspagem) forneceu resultado bastante inferior, com tal padrão ocorrendo para ambos os suportes. Tal fato indica que apenas a sonicação não é suficiente para desprendimento efetivo do biofilme. Já para a proporção de voláteis, o UM1 destoou dos demais apenas no suporte K1, o que pode estar relacionado ao desprendimento deficitário da biomassa, preferencialmente das camadas mais superficiais do biofilme. Isto leva à hipótese de que os resultados estariam associados às características do biofilme, como sua espessura, resistência ao cisalhamento ou biomassa aprisionada ao biofilme e não efetivamente aderida ao suporte (DONLAN & COSTERTON, 2002) e não diretamente aos suportes utilizados.

Para o MM, a forma da biomídia MOD940 (longa e compartimentada) restringiu a extração manual em determinados pontos do suporte, o que explica o desempenho comprometido deste método em relação ao PDM1 para o suporte MOD940 e não para o K1 (de fácil limpeza manual). Entretanto, mesmo subestimando a concentração de sólidos do reator, as técnicas por extração manual ou sonicação oferecem a vantagem de preservarem a comunidade bacteriana, sendo úteis para testes de sedimentabilidade e microscopia do lodo aderido, entre outros.

No NaOHM1, um dos principais inconvenientes foi a sua rápida reidratação após ser removido da estufa ou mufla, prejudicando a pesagem dos cadinhos mesmo após permanência em dessecador. Adicionalmente, é possível que reações químicas entre o hidróxido de sódio e o biofilme tenham ocorrido, além de perda de água higroscópica na mufla. Esse método forneceu valores elevados de SAT por suporte, principalmente para o suporte K1, destoando significativamente dos demais resultados. O NaOHM2 (extração por NaOH seguido de centrifugação) forneceu baixos valores de sólidos aderidos totais, possivelmente devido à lise celular provocada pelo hidróxido de sódio, que pode ter favorecido a solubilização de material antes intracelular (CAMMAROTA & SANT'ANNA, 1998). Dessa forma, ao centrifugar o produto da extração para separar o NaOH do precipitado, perde-se parte do conteúdo da biomassa que, se não tivesse sofrido lise, também estaria precipitada. Procedimento análogo ocorreria se o material fosse filtrado, também na tentativa de separar o hidróxido de sódio dos sólidos extraídos. Dessa forma, percebe-se que técnicas que causam lise celular não são indicadas para quantificações do tipo SST ou SSV equivalente (resíduo não filtrável da extração do biofilme).

Já para a proporção de voláteis, as metodologias baseadas na extração do biofilme com emprego de NaOH apresentaram valores destoantes dos demais métodos e fora da faixa usual reportada na literatura, desde valores baixos, como 50%, até próximos ou mesmo superiores a 100% (DUAN *et al.*, 2013; JORDÃO & PESSÔA, 2011). OLIVEIRA (2008) também encontrou percentual de voláteis significativamente inferior na comparação de método com emprego de NaOH com outros baseados em forças mecânicas para extração da biomassa imobilizada.

Considerando todos os resultados apresentados, foi adotado o PDM1 para monitoramento dos sólidos totais aderidos (SAT) em ambos os reatores (piloto e bancada) ao longo de todo estudo. Já para a quantificação da fração volátil, o UM3 foi empregado para obtenção do percentual SAV/SAT, que era então aplicado aos resultados obtidos pelo método PDM1.

MOVIMENTAÇÃO DOS SUPORTES

No MBBR em escala de bancada, apesar da manutenção de valores de OD superiores aos da escala piloto, a circulação das biomédias foi deficitária, com as grandes dimensões do suporte utilizado não sendo compatíveis com o pequeno volume do reator. Tal comportamento, aliado à maior e mais facilmente biodegradável carga orgânica afluyente, levou a maiores espessuras do biofilme e mesmo ao alastramento por todo reator de um material gelatinoso amarelado, altamente hidratado, rico em polissacarídeos e proteínas, abrigando uma ampla comunidade microbiana, porém de baixa densidade, provavelmente associado à produção excessiva de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (Figura 4 - a). Embora sejam de fundamental importância para o biofilme, atuando na sua estruturação e proteção, concentrações muito elevadas de EPS podem acarretar problemas em sistemas de tratamento de efluentes, além de interferir no valor da DQO e na turbidez do efluente tratado (ALMADA, 2012). Endossando tal afirmação, o crescimento descontrolado do biofilme no reator de bancada contribuiu para o rápido entupimento do sistema de aeração e encapsulamento das biomédias, como ilustra a Figura 4 - b & c.

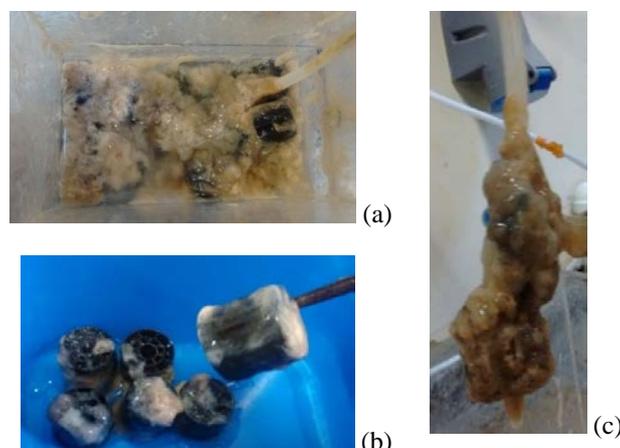


Figura 4: Proliferação excessiva de EPS na condição operacional “70%, 1,5h” no reator de bancada. Colmatação do reator (a) e encapsulamento das biomédias (b) e difusores (c).

Tal produção excessiva de EPS pode ter sido induzida por uma mudança no comportamento bacteriano em resposta contrária ao arraste da biomassa, sobretudo, no baixo TDH. De fato, a proliferação de tal material foi maior nas configurações operacionais de menor TDH (1,5h), ainda mais no recheio de 70%. Comparando efluentes sintético e real, DUAN *et al.* (2013) concluíram que o efluente sintético gerou maior produção de EPS ricos em proteínas em sistema MBBR.

A hipótese de produção excessiva de EPS atrelada ao baixo TDH é corroborada pela análise da remoção de amônia ao longo das diversas condições operacionais do sistema de bancada (Figura 5). Nas condições de baixo TDH (1,5 h), houve remoção de amônia de até 80%, mas ausência de nitrificação, tendo em vista que não houve produção de NO_x (NO₂ e NO₃). Como o pH não possibilitaria a remoção de amônia por arraste (*stripping*), percebe-se que o nitrogênio amoniacal foi consumido exclusivamente para produção de EPS e crescimento celular. Já no TDH de 3,3 h, a nitrificação ocorreu em todas as frações de recheio testadas (50, 30 e 10%). Entretanto, trabalhando também com efluente sintético e baixo TDH (1 h), WANG *et al.* (2005) conseguiram nitrificação de até 50% do total de amônio afluente. Desse modo, é possível que a produção de material extracelular nesta pesquisa possa estar relacionada não apenas ao baixo TDH, mas também à circulação deficitária e, conseqüente reduzido cisalhamento sobre as biomédias no reator de bancada.

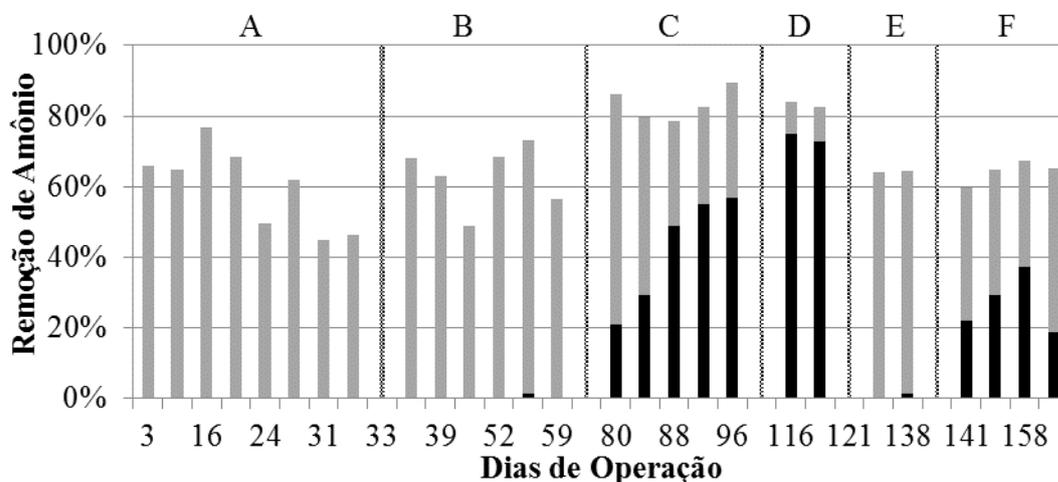


Figura 5: Eficiência na remoção de amônia por nitrificação (preto) e por crescimento celular ou síntese de EPS (cinza) no sistema MBBR escala de bancada ao longo das diversas condições operacionais de recheio e TDH (A:70%,1,5h; B: 50%,1,5h; C:50%,3,3h; D:30%,3,3h; E:30%, 1,5h; F: 10%, 3,3h).

Já no MBBR em escala piloto, a aeração vigorosa e as maiores dimensões do reator permitiram uma boa circulação das biomédias, mesmo a 70% de recheio. Como consequência da baixa carga orgânica afluente, a espessura do biofilme manteve-se fina (BASSIN, 2012), como recomendado para maximizar a difusão de substrato às camadas mais internas (RUSTEN *et al.*, 2006). Em consequência, percebe-se que a fração de recheio máxima admissível para um sistema MBBR não é universal e está fortemente atrelada à forma e ao tamanho do reator e dos suportes (WANG *et al.*, 2005).

CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS E ARMAZENAMENTO POR MÍDIA

No sistema MBBR piloto, os sólidos aderidos representaram a fração majoritária da biomassa presente no reator, como mostra a Figura 6. À exceção do dia 117 (esgoto atípico de elevada turbidez), a porção em suspensão representou menos de 10% dos sólidos voláteis totais quantificados no reator (soma de SSV e SAV), sendo mesmo inferior a 5% em grande parte do tempo. Trabalhando também com MBBR piloto tratando esgoto bruto, PLATTES *et al.* (2006) obtiveram percentual semelhante para SSV, de 7% em relação à biomassa total presente no reator. O percentual em suspensão pareceu independer da fração de recheio ou vazão impostos, possivelmente variando segundo as características do esgoto afluente (concentração de matéria orgânica, presença de compostos potencialmente inibidores ou tóxicos etc.). WANG *et al.* (2005) também constataram baixa e invariável concentração de biomassa em suspensão para FR a partir de 30%. Já no

reator de bancada, por conta da proliferação de material gelatinoso entre outras complicações operacionais, os sólidos em suspensão não foram rotineiramente medidos, o que não permitiu verificar esse comportamento.

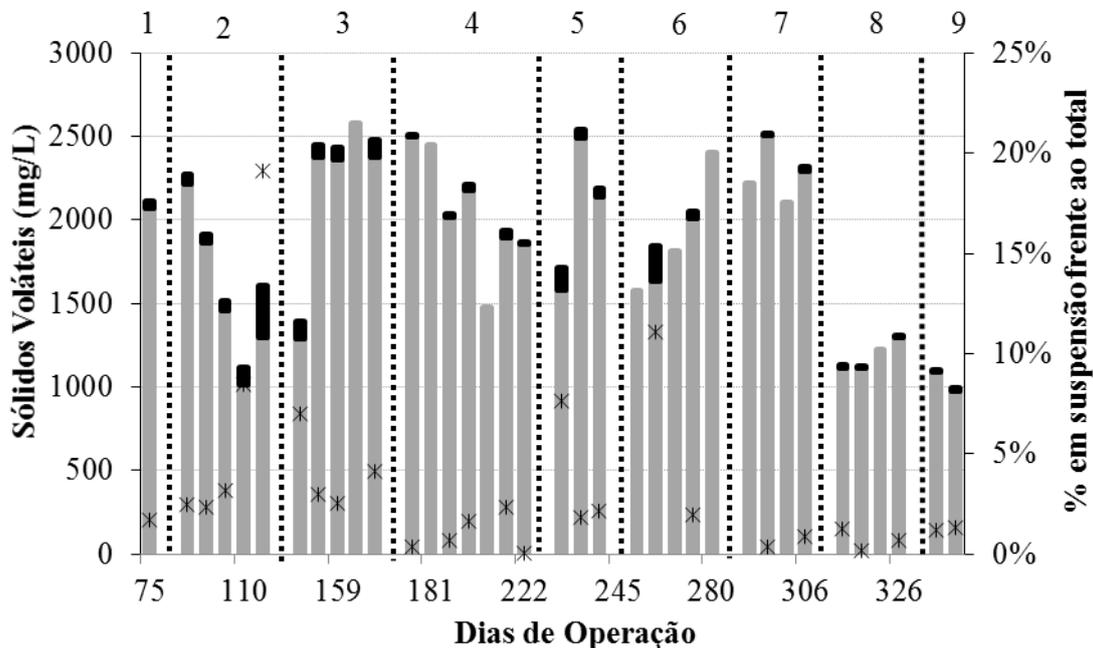


Figura 6: SAV (cinza), SSV (preto) e proporção de SSV em relação aos sólidos voláteis totais (SSV+SAV) (*) no MBBR piloto nas diversas condições de recheio e TDH (1:70%, 0,9h; 2: 70%, 1,1h; 3:70%, 1,5h; 4:70%, 2,2h; 5:70%, 0,9h; 6:50%, 2,2h; 7:50%, 5h; 8:30%, 2,2h; 9:30%, 5h).

Já as concentrações de SAV variaram de 1000 a 2500 mg/L no MBBR piloto, segundo cada condição operacional, estando frequentemente em torno de 2000 mg/L para as condições de recheio de 70 e 50%, valor próximo ao encontrado por GONG *et al.* (2012) em sistema MBBR de bancada também tratando esgoto fraco advindo de campus universitário. Não obstante, recebendo efluente real e sujeito a um ambiente menos estável, os sólidos voláteis no reator piloto foram função não somente das mudanças operacionais propositais (vazão e recheio), mas também das características do esgoto afluente.

Na segunda condição operacional, esgoto afluente atípico (elevada turbidez e coloração escura) e problemas rotineiros no controle da vazão parecem ter tido efeito adverso sobre a biomassa, havendo frequente ocorrência de espuma nesse período. Na transição do segundo para o terceiro regime, a estabilização da vazão afluente parece ter impactado positivamente a biomassa, que se manteve superior a 2000 mgSAV/L até o dia 196, quando o compressor responsável pela aeração do reator apresentou problemas técnicos e parou de funcionar. Apesar de não desejável, tal situação pode ocorrer na prática e as consequências são muitas vezes uma incógnita. Observou-se que, com a ausência de aeração durante 12 dias, a concentração de SAV diminuiu para 1500 mgSAV/L (queda de 25%) e o biofilme tornou-se mais mineralizado, com a proporção de voláteis reduzida a 65% de SAV/SAT (queda de 10%). A manutenção da biomassa em estado anaeróbio, de menor rendimento celular, pode ajudar a explicar a queda na concentração de biomassa (JORDÃO & PESSÔA, 2011). Uma semana após a substituição do compressor, valores próximos a 2000 mgSAV/L voltaram a ser constatados e o biofilme já apresentava proporção de voláteis acima de 70% (SAV/SAT), o que mostra a elevada resiliência de sistemas MBBR.

Outra queda na concentração de sólidos aderidos foi quando a fração de recheio foi reduzida de 70 para 50% (da quinta para a sexta condição operacional), explicada pela redução na quantidade de biomédias no reator. Entretanto, percebeu-se nítida tendência de aumento da concentração ao longo desta última condição operacional, estabilizando-se acima de 2000 mgSAV/L neste recheio (fases 6 e7). Com o número reduzido de suportes no reator, tal resultado só seria possível se houvesse aumento dos sólidos aderidos por biomédia na passagem de 70 para 50% de recheio. A Figura 7 (esquerda) ratifica, pois, tal hipótese ao apresentar os valores médios de SAT por biomédia em cada condição operacional (para a condição “50%, 2,2h”, apenas o último ponto foi considerado, de modo a refletir os valores de equilíbrio encontrados nessa fase operacional).

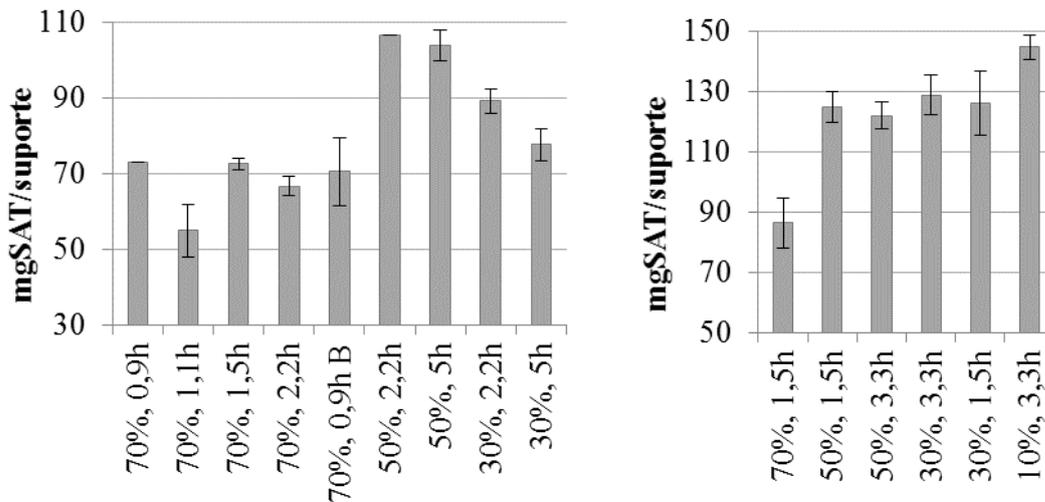


Figura 7: Valores médios de mgSAT/biomídia (cinza) nos sistemas MBBR piloto (esquerda) e de bancada (direita) em cada condição operacional testada. Barras verticais indicam o erro padrão.

Percebe-se que a massa de sólidos aderidos por biomídia pareceu não variar para as diversas vazões testadas, sendo principalmente função da fração de recheio. Para os regimes a 70% de enchimento, valores em torno de 70 mgSAT/biomídia foram obtidos, chegando a quase 110 e 80 mgSAT/biomídia, respectivamente, a 50 e 30% de recheio. Efetivamente, a concentração de sólidos aderidos é fruto do equilíbrio entre a adesão e o desprendimento microbiano, sendo fortemente influenciada pela fração de recheio (WANG *et al.*, 2005).

Na última condição testada de recheio no MBBR piloto (30%), a expressiva diminuição do número de suportes no reator levou a concentrações de biomassa aderida mais baixas, da ordem de 1000 mgSAV/L (Figura 6 – regimes 8 e 9), ocorrendo queda no armazenamento de sólidos por suporte, se comparado ao recheio de 50% (Figura 7 - esquerda). O sistema MBBR de bancada também apresentou aumento na massa de sólidos por biomídia na transição do regime de 70 para 50% de FR, todavia com valores bastante superiores ao do reator piloto, haja vista o biofilme mais espesso e a ausência de condições adversas (Figura 7 - direita). Contudo, diferentemente da escala piloto, a massa de sólidos por biomídia não diminuiu na passagem de 50 para 30% de recheio e aumentou ligeiramente a 10%. WANG *et al.* (2005) também constataram pico de concentração de sólidos aderidos a 50% de recheio. Comportamento similar foi verificado por GU *et al.* (2014), apesar da estocagem de biomassa por suporte (mg/suporte) ter diminuído com o aumento da fração de recheio.

No reator piloto, os valores de SAV/SAT foram, em geral entre 75 e 80% de SAV/SAT, enquanto que no reator de bancada valores superiores foram obtidos (entre 85 a 89%), fruto, provavelmente da elevada carga orgânica facilmente biodegradável (BASSIN, 2012). Em ambos, tal parâmetro pareceu ser independente da fase operacional testada.

CARGA ORGÂNICA E CRESCIMENTO DO BIOFILME - MEDIAÇÃO DA FRAÇÃO DE RECHEIO

Mesmo com a influência da fração de recheio sobre o armazenamento de sólidos por suporte, é sabido que a carga orgânica afluyente também condiciona o crescimento do biofilme (BASSIN, 2012). Dessa forma, é de se esperar que a velocidade de tal crescimento seja mediada, entre outros fatores pela própria fração de recheio. Desconsiderando-se os pontos em que a concentração de sólidos aderidos parecia não estar em equilíbrio (Figura 6), a Figura 8 apresenta a relação entre mgSAT/biomídia e carga orgânica superficial (COS) afluyente ao reator, definida como a relação entre carga de DQO afluyente ao reator por unidade de tempo e a área superficial do material suporte de biomassa (ABNT, 2011).

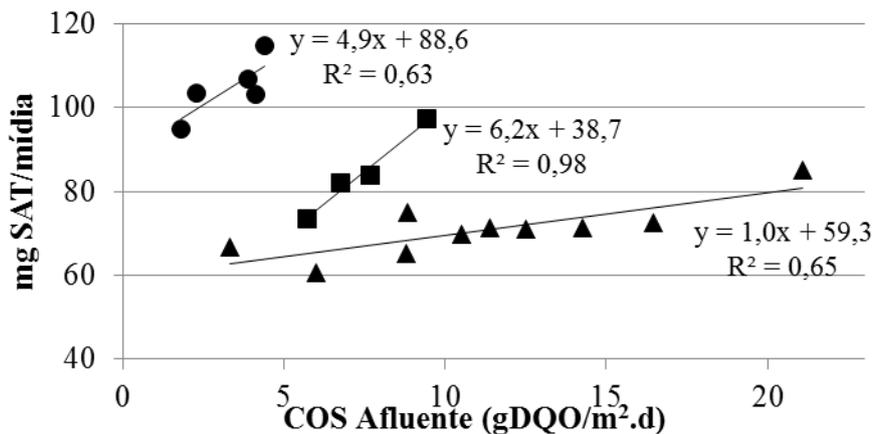


Figura 8: Relação mgSAT/biomédia em função da carga orgânica superficial (COS) aplicada nas diferentes condições de recheio testadas no MBBR em escala piloto: 70% (▲), 50% (●) e 30% (■).

Percebe-se que, de fato, a massa de sólidos pareceu ser diretamente proporcional à COS afluente, mas que essa tendência pareceu se acentuar com a diminuição da FR, ilustrada pelo aumento dos coeficientes lineares das retas de ajuste. É provável que tal resultado esteja atrelado à diminuição da turbulência no reator e das colisões entre biomédias em condições menos expressivas de recheio. Dessa forma, o cisalhamento sobre o biofilme é menor e a biomassa pode crescer frente a maiores concentrações de substrato sem ser constantemente despreendida do suporte (GU *et al.*, 2014). A 70% de FR, o biofilme mais denso deve ter tido um crescimento efetivo mais lento e por isso sua resposta frente a aumentos de carga orgânica foi expressivamente menor ao exibido pelos outros recheios. Para o reator de bancada essa análise não pode ser realizada, haja vista a quantificação de sólidos aderidos apenas uma vez por regime e a constância da DQO afluente.

ARMAZENAMENTO DE BIOMASSA POR METRO QUADRADO DE SUPORTE

Por último, é importante discutir o armazenamento de biomassa por metro quadrado de suporte, parâmetro essencial no projeto de sistemas MBBR. De acordo com o fabricante, a biomédia utilizada possui armazenamento de biomassa de 20,0 gSST/m², valor superior ao preconizado pela NBR 12.209/2011, que discorre que a massa aderida deve ser considerada até 12,0 gSSV/m² para fins de dimensionamento dos reatores (ABNT, 2011). Aplicando-se uma relação SSV/SST típica de 80%, percebe-se que os valores do fabricante seriam 33% superiores aos da norma brasileira. Adicionalmente, para esse parâmetro, o fabricante não citou as condições operacionais nas quais os valores indicados foram obtidos (fração de recheio, tipo de afluente, tamanho do reator, etc.), bem como o método de quantificação de sólidos utilizado. Contrariamente, neste estudo, mostrou-se que todas as condições citadas contribuem para diferenças substanciais nos valores de mgSAT/biomédia. A Tabela 2 indica os valores encontrados de gSAT/m² em cada condição operacional testada nos dois reatores, baseando-se na área específica informada pelo fabricante (687 m²/m³).

Tabela 2: Valores de gSAT/m² para ambos os reatores em cada condição operacional testada.

Piloto		Bancada	
Regime	gSAT/m ²	Regime	gSAT/m ²
70%, 0,9h	6,3	70%, 1,5h	7,5
70%, 1,1h	4,8	50%, 1,5h	10,8
70%, 1,5h	6,3	50%, 3,3h	10,6
70%, 2,2h	5,8	30%, 3,3h	11,2
70%, 0,9h B	6,1	30%, 1,5h	10,9
50%, 2,2h	9,3	10%, 3,3h	12,5
50%, 5h	9,0		
30%, 2,2h	7,7		
30%, 5h	6,7		

Mesmo para os valores mais altos obtidos com o sistema de bancada, cabe ressaltar que, como estão expressos em gSAT/m^2 , os valores em termos de gSST/m^2 seriam ainda menores e, logo, ainda mais distantes dos indicados pelo fabricante. Somado a isso, deve-se lembrar que o reator em escala de bancada operando com afluente sintético representa uma situação idealizada, que frequentemente sobrestimará os valores encontrados em campo.

Em estudo também com sistema MBBR piloto tratando esgoto sanitário primário, RUSTEN *et al.* (1995a) obtiveram $18 \text{ gSAT}/\text{m}^2$, utilizando técnica de quantificação de sólidos aderidos similar ao PDM1 (pesagem direta descontando valor da biomídia limpa). Mesmo assim, todos os valores citados referem-se a sólidos aderidos como um todo (fração filtrável e não filtrável), o que já é uma sobrestimação em relação aos valores expressos em termos de gSST/m^2 (resíduos não filtráveis da extração).

Dessa forma, recomenda-se revisão dos valores de armazenamento de sólidos por m^2 do suporte MOD940 (AMBIO), tornando-os mais realistas. Além disso, seria interessante que as condições operacionais utilizadas na quantificação dos resultados de armazenagem de biomassa fossem claramente explicitadas ao lado de tais valores. Somado a isso e considerando a grande variabilidade nos resultados obtidos pelas diferentes metodologias avaliadas neste trabalho, percebe-se que a especificação do método de extração e quantificação de sólidos aderidos empregado também é essencial para a reprodutibilidade dos dados.

CONCLUSÕES & RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho buscou contribuir para o conhecimento acerca da dinâmica de sólidos em sistemas MBBR, com vistas a sua melhor operação, bem como para a padronização futura dos testes de quantificação de sólidos aderidos, fração predominante de biomassa nesse tipo de sistema biológico de tratamento, destacando-se:

- **Métodos de Quantificação de Sólidos Aderidos:** os diversos métodos para quantificação de sólidos aderidos apresentaram limitações e vantagens distintas. O PDM1 (pesagem direta descontando valor da mídia limpa) e o UM3 (extração por ultrassom seguido de raspagem manual) foram os mais indicados para a correta quantificação dos sólidos aderidos totais e a fração volátil, respectivamente, com as duas mídias testadas, sugerindo sua aplicação em ETEs para monitoramento da concentração de biomassa em MBBR;
- **Movimentação dos Suportes:** nas condições de elevado recheio e carga, houve produção excessiva de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) no sistema de bancada, sendo indicado uma movimentação adequada dos suportes para a correta operação dos reatores;
- **Concentração de Sólidos e Armazenamento por mídia:** a concentração de biomassa no reator de bancada foi superior à do piloto, provavelmente devido à alimentação, de composição invariável ao longo do tempo, isenta de inibidores e com maior conteúdo orgânico facilmente biodegradável. A fração de recheio pareceu induzir mudanças na espessura do biofilme e no armazenamento de biomassa por mídia, sendo que em ambos os sistemas, o armazenamento aumentou com a diminuição da fração de recheio de 70% para 50%. Os resultados também evidenciaram a resiliência do MBBR frente a condições adversas, com o reator piloto apresentando novamente sua concentração de biomassa usual já na semana seguinte à retomada da aeração, após sua interrupção por 12 dias consecutivos;
- **Carga Orgânica e Crescimento do Biofilme:** a massa de sólidos por mídia pareceu ser diretamente proporcional à carga orgânica superficial afluente, mas essa tendência pareceu se acentuar com a diminuição da FR, provavelmente devido à diminuição das colisões entre biomídias, possibilitando à biomassa crescer sem ser constantemente desprendida dos suportes;
- **Armazenamento de biomassa por metro quadrado de suporte:** os valores encontrados foram significativamente inferiores aos indicados pelo fabricante. É provável que tais erros estejam associados aos métodos de quantificação de sólidos aderidos ou condições operacionais empregadas pelo fabricante, recomendando-se que tais informações sejam devidamente explicitadas quando da especificação técnica de um meio suporte para sistemas MBBR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR-12.209. Norma Brasileira para Elaboração de Projetos Hidráulico-sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários. Rio de Janeiro. 2011.
2. ALMADA, R. B. Avaliação de Reatores de Leito Móvel com Biofilme (MBBR) em série para tratamento de diferentes efluentes de refinaria de petróleo visando ao reuso industrial. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
3. AMBIO ENGENHARIA LTDA. Recheio Plástico para Tratamento Biológico - Modelo MOD940. Catálogo do Produto. Rio de Janeiro: [s.d.].
4. ANA; MCIDADES. Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas: Tratamento de Esgotos Urbanos. Brasília. Consulta prévia à publicação.
5. APHA. Standard methods for examination of water and wastewater. 21. ed. Washington D.C.: APHA - American Public Health Association, 2005.
6. BASSIN, J. P. Remoção biológica de nutrientes em sistemas compactos e estudo da diversidade microbiana por técnicas de biologia molecular. Tese de Doutorado. UFRJ, 2012.
7. CAMMAROTA, M. C.; SANT'ANNA, G. L. *Metabolic blocking of exopolysaccharides synthesis: Effects on microbial adhesion and biofilm accumulation. Biotechnology Letters*, v. 20, n. 1, p. 1–4, 1998.
8. DONLAN, R. M.; COSTERTON, J. W. *Biofilms: Survival Mechanisms of Clinically Relevant Microorganisms. Clinical Microbiology*, v. 15, n. 2, p. 167–193, 2002.
9. DUAN, L.; JIANG, W.; SONG, Y.; XIA, S.; HERMANOWICZ, S. *The characteristics of extracellular polymeric substances and soluble microbial products in moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor. Bioresource Technology*, v. 148, p. 436–442. 2013.
10. GONG, L.; JUN, L.; YANG, Q.; WANG, S.; MA, B.; PENG, Y. *Biomass characteristics and simultaneous nitrification-denitrification under long sludge retention time in an integrated reactor treating rural domestic sewage. Bioresource Technology*, v. 119, p. 277–284. 2012.
11. GRUPO ÁGUAS DO BRASIL. Informações internas solicitadas por e-mail sobre ETE's com tecnologia MBBR operadas pelo Grupo. 2016.
12. GU, Q.; SUN, T.; WU, G.; LI, M.; QIU, W. *Influence of carrier filling ratio on the performance of moving bed biofilm reactor in treating coking wastewater. Bioresource Technology*, v. 166, p. 72–78, 2014.
13. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 6ª. ed. Rio de Janeiro. 2011.
14. LEVSTEK, M.; PLAZL, I. *Influence of carrier type on nitrification in the moving-bed biofilm process. Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 875–882, 2009.
15. LOPEZ-LOPEZ, C.; MARTÍN-PASCUAL, J.; GONZÁLES-MARTÍNEZ, A.; CALDERÓN, K.; GONZÁLEZ-LOPEZ, J.; HONTORÍA, E.; POYATOS, J. *Influence of filling ratio and carrier type on organic matter removal in a moving bed biofilm reactor with pretreatment of electrocoagulation in wastewater treatment. Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 47, p. 1759–1767, 2012.
16. MAHENDRAN, B.; LISHMAN, L.; LISS, S. N. *Structural, physicochemical and microbial properties of flocs and biofilms in integrated fixed-film activated sludge (IFFAS) systems. Water Research*, v. 46, n. 16, p. 5085–5101, 2012.
17. MARTÍN-PASCUAL, J.; LOPEZ-LOPEZ, C.; CERDÁ, A.; GONZÁLEZ-LOPEZ, J.; HONTORÍA, E.; POYATOS, J. *Comparative kinetic study of carrier type in a moving bed system applied to organic matter removal in urban wastewater treatment. Water, Air, and Soil Pollution*, v. 223, n. 4, p. 1699–1712, 2012.
18. OLIVEIRA, D. V. M. DE. Caracterização dos Parâmetros de Controle e Avaliação de Desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR). Dissertação de Mestrado. UFRJ, 2008.
19. PLATTES, M.; HENRY, E.; SCHOSSELER, P. M.; WEIDENHAUPT, A. *Modelling and dynamic simulation of a moving bed bioreactor for the treatment of municipal wastewater. Biochemical Engineering Journal*, v. 32, n. 2, p. 61–68, 2006.
20. RUSTEN, B.; EIKEBROKK, B.; ULGENES, Y.; LYGREN, E. *Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquacultural Engineering*, v. 34, n. 3, p. 322–331, maio 2006.
21. RUSTEN, B.; HEM, L. J.; ØDEGAARD, H. *Nitrification of municipal wastewater in moving-bed biofilm reactors. Water Environment Research*, v. 67, n. 1, p. 75–86, 1995a.
22. RUSTEN, B.; HEM, L. J.; ØDEGAARD, H. *Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving-bed biofilm reactors. Water Environment Research*, v. 67, n. 1, p. 65–74, 1995b.
23. WANG, R.-C.; WEN, X.-H.; QIAN, Y. *Influence of carrier concentration on the performance and microbial characteristics of a suspended carrier biofilm reactor. Process Biochemistry*, v. 40, n. 9, p. 2992–3001, 2005.