

Influência do projeto do separador de fases sobre o desempenho do reator UASB no tratamento de águas residuárias municipais

Influence of the phase separator project on the performance of UASB reactors treating sewage

- ▶ **Data de entrada:**
20/05/2013
- ▶ **Data de aprovação:**
05/05/2015

Adrianus van Haandel | Silvânia Lucas dos Santos | Sílvia Raphaelae Morais Chaves* | José Willams Nogueira da Costa

DOI 10.4322/dae.2014.153

Resumo:

O objetivo do tratamento de esgoto anaeróbio é maximizar a fração de material orgânico no afluente, que é transformada em metano, minimizando, assim, as frações de DQO que são descarregadas com o efluente ou como lodo de excesso. Os dados experimentais deste artigo mostram que, no caso de aplicação de um reator UASB para o tratamento de esgoto, o projeto do separador de fases tem influência importante no desempenho do reator. Um separador de fases eficiente leva à retenção de uma maior massa de lodo, o que resulta em aumento do tempo médio de retenção de sólidos ou da idade do lodo. Os dados mostram que a idade do lodo é o parâmetro operacional fundamental que determina a eficiência do tratamento anaeróbio. Uma maneira simples de melhorar o desempenho do separador de fases é a aplicação de placas paralelas na zona de sedimentação do reator UASB, acima do separador de fases convencional de prismas triangulares com uma base aberta.

Palavras-chave: Tratamento anaeróbio de esgoto. Reator UASB. Projeto do separador de fases. Otimização do desempenho. Idade do lodo.

Abstract:

The goal of anaerobic sewage treatment is to maximize the fraction of organic material in the influent that is transformed into methane, thus minimizing the COD fractions that are discharged with the effluent or as excess sludge. The experimental data in this article shows that in the case of applying a UASB reactor for treating sewage the phase separator design has an important influence on the performance of the reactor. An efficient phase separator leads to the retention of a greater mass of sludge, which means that the mean retention time of the solids or sludge age increases. The data show that sludge age is the fundamental operational parameter which determines the efficiency of the anaerobic treatment. A simple way to improve the performance of the phase separator is the use of parallel plates in the settling zone of the UASB reactor conventional on top of the phase separator of triangular prisms with a base open.

Keywords: Anaerobic sewage treatment. UASB reactor. Phase separator project. Performance optimization. Sludge age.

* **Endereço para correspondência:**

Universidade Federal de Campina Grande – Aprígio Veloso 882, CEP 58109-783 Campina Grande/PB, Brasil
E-mail: adrianusvh@gmail.com

INTRODUÇÃO

As duas principais condições para que qualquer sistema biológico de tratamento de águas residuais tenha um bom desempenho são: (1) assegurar um bom contato entre o substrato que está entrando e a massa de lodo presente no sistema; e (2) manter uma grande massa de lodo no sistema (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). No reator *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), o afluente é dividido uniformemente no fundo e, seguindo uma trajetória ascendente, passa por uma camada de lodo, sendo depois retirado no topo. Assim, o contato entre o material orgânico do afluente e a massa de lodo no reator é automaticamente garantido. A fim de manter uma massa de lodo elevada, o reator UASB emprega um separador de fases interno, no qual os sólidos suspensos são retidos por sedimentação, para que um efluente virtualmente livre de sólidos sedimentáveis possa ser descarregado. As partículas de lodo acumuladas no decantador acabam deslizando de volta para a zona de digestão, contribuindo, assim, para a manutenção de uma grande massa de lodo no reator, satisfazendo a segunda condição para um bom desempenho.

Devido à síntese da biomassa e à floculação das partículas do afluente, há um crescimento contínuo da massa de lodo no reator. No entanto, a massa de lodo que pode ser acumulada no reator é limitada e, uma vez “cheio” de lodo, qualquer produção nova leva a uma descarga da massa de lodo equivalente à que foi produzida, com o efluente, caso não haja descarga intencional do lodo de excesso. No reator UASB, sempre há descarte não intencional de lodo no efluente, como também pode haver descargas intencionais. A idade do lodo ou o tempo médio de retenção dos sólidos no reator é a razão entre a massa de lodo presente no reator e as taxas decorrentes da perda não intencional e da perda intencional de lodo.

É importante salientar que, como resultado do mecanismo de retenção dos sólidos, o tempo de re-

tenção de sólidos ou a idade do lodo (R_s) será sempre superior ao tempo de retenção de líquido (R_h). A diferença torna-se mais pronunciada na medida em que o separador de fases é mais eficiente. Em um reator UASB tratando esgoto em regiões tropicais, normalmente o tempo de retenção de líquido é da ordem de quatro a oito horas e a idade do lodo, na faixa de 30 a 50 dias (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994), de modo que $R_s/R_h \gg 100$ a 300.

É bastante notável o desempenho do reator UASB como unidade de tratamento de esgoto em condições adequadas. Em regiões com clima quente (temperatura do esgoto acima de 18 °C), a eficiência de remoção do material orgânico é elevada, em torno de 65% a 80% da Demanda Química do Oxigênio (DQO) do afluente, podendo esse percentual de remoção ser obtido em reatores UASB convencionais, operando com um tempo de retenção de líquido de curta duração (quatro a oito horas) (CAMPOS, 1999; VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994). Isso pode ser atribuído principalmente ao fato de, por meio da aplicação de um separador de fases, a idade do lodo tornar-se, pelo menos a princípio, independente do tempo de retenção de líquido. Mantendo uma longa idade do lodo, uma grande massa de lodo estará presente no reator, o que é fundamental para aumentar a eficiência da remoção do material orgânico biodegradável.

A deterioração do desempenho do reator UASB ao diminuir o tempo de retenção de líquido deve ser atribuída aos seguintes fatores: a) incapacidade crescente do separador de fases de reter o lodo com o aumento da carga hidráulica, levando a uma redução da idade do lodo; e b) tempo curto de permanência, que dificulta a hidrólise da DQO biodegradável no lodo retido e sua conversão em substrato solúvel, depois transformado em metano. O aumento da fração de DQO no efluente é, em parte, devido à presença de material biodegradável do afluente, que aumenta com tempo de retenção de líquido mais curto. Além disso, a produção de lodo aumenta quando diminui esse tempo, porque par-

te da matéria particulada afluyente e biodegradável é descarregada antes que a hidrólise se complete. Portanto, o material fecal (biodegradável e não biodegradável), misturado com lodo bacteriano, estará presente no lodo de excesso.

Métodos mais eficientes para a retenção de lodo podem levar a uma diminuição da perda do material orgânico particulado, reduzindo, assim, a fração da DQO descarregada com o efluente. Além disso, a retenção de lodo eficiente provoca um aumento da idade do lodo no reator, o que, por si só, aumenta não somente a eficiência da hidrólise e subsequente digestão, mas também a massa de lodo bacteriana. Portanto, se o projeto do separador de fases é aperfeiçoado para reter mais eficientemente o lodo, uma redução do tempo de retenção de líquido pode ser aplicada, sem diminuir o desempenho do sistema.

Uma alternativa para conseguir reter mais o lodo no sistema é por meio da aplicação de placas paralelas na zona superior do separador de fases convencional, criando um decantador de alta taxa, unidade frequentemente utilizada nas instalações de tratamento de água. Um reator UASB equipado com tal dispositivo tem um desempenho melhor do que um reator que possui apenas o separador de fases convencional, operando sob condições comparáveis. Conseqüentemente, o reator com um separador mais eficiente pode suportar cargas mais elevadas e, ainda, ter um desempenho igual ao do reator convencional. Por isso, o tempo de retenção de líquido pode ser reduzido quando o projeto do separador de fases é melhorado.

Este artigo trata dos resultados de uma investigação experimental que avaliou a influência do projeto do separador de fases no desempenho de reatores UASB. Para esse efeito, a eficiência de remoção da DQO e a produção de lodo foram observadas como funções do tempo de retenção de líquido, em dois reatores de dimensões idênticas e que recebiam a mesma carga de águas resi-

duais, mas equipados com projetos diferentes de separação de fases. O primeiro reator UASB teve um separador convencional (prismas triangulares com uma base aberta – Figura 1a) e o segundo, uma concepção melhorada (Figura 1b), tendo as placas paralelas acima do projeto convencional.

RETENÇÃO DE LODO EM REATORES UASB COM DIFERENTES PROJETOS DE SEPARADOR DE FASES

O separador de fases convencional se compõe de elementos prismáticos colocados no reator UASB, dividindo-o em uma zona inferior de digestão e uma zona superior de sedimentação (Figura 1a). Esse separador divide as três fases no reator (sólido-líquido-gás) por dois mecanismos distintos. A separação das fases gás-líquido e gás-sólido ocorre abaixo das unidades prismáticas, na interface da fase de líquido na câmara de gás, sendo o gás retirado e os sólidos retornados à zona inferior. A separação sólido-líquido adicional ocorre na zona de sedimentação, acima dos elementos de separação; desse modo, as partículas com taxa de sedimentação suficientemente elevada superam a força de arraste do fluxo ascendente do líquido e, eventualmente, sedimentam sobre os elementos de separação. Os sólidos sedimentados acabam voltando para a zona de digestão, quando se acumula uma camada de lodo com massa suficiente.

Um floco não pode ser retido se sua velocidade de sedimentação é menor que a velocidade ascendente do líquido no reator UASB. Portanto, existe uma velocidade crítica de retenção de flocos, tal que:

$$s_c < v_l \quad (1)$$

Em que:

- s_c = velocidade crítica de sedimentação que permite a retenção dos flocos;
- v_l = velocidade ascendente do líquido (= vazão/área).

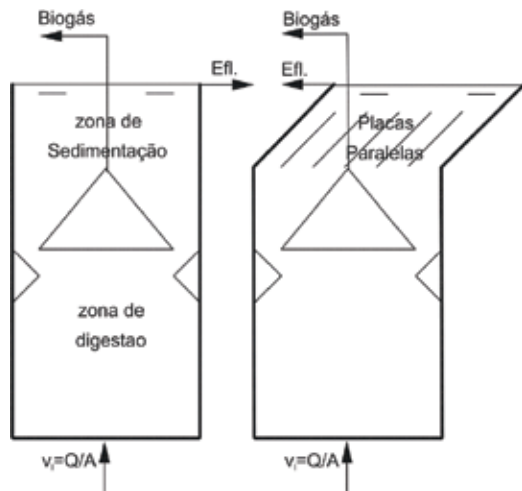


Figura 1 – Projetos diferentes de separadores de fases para reatores UASB: (a) convencional; (b) com placas paralelas adicionais.

Se não houver floculação na zona de sedimentação, apenas as partículas com uma velocidade de sedimentação superior à velocidade ascendente mínima do líquido na zona de sedimentação poderão ser retidas. Flocos com uma velocidade de sedimentação menor que a crítica (s_c) serão arrastados para fora do sistema pelo fluxo do líquido e descarregados com o efluente.

No projeto alternativo representado na Figura 1b, o separador de fases é composto por duas partes: (1) separador convencional, que efetua a separação do biogás e de parte do lodo; e (2) adição de placas paralelas, que são colocadas para facilitar a sedimentação e, assim, reter os flocos que escapam do separador convencional. Agora, a eficiência de retenção dos sólidos é dada pela velocidade de sedimentação crítica na zona das placas paralelas, que pode ser calculada como se mostra na Figura 2. Quando uma partícula de lodo se desloca entre duas placas, à medida que o líquido flui pelo espaço entre as placas, as partículas sedimentam e tocam na segunda placa antes que o efluente deixe a zona de sedimentação; tais partículas seriam retidas e, eventualmente, depositadas sobre as placas. Pela Figura 2, enquanto o líquido per-

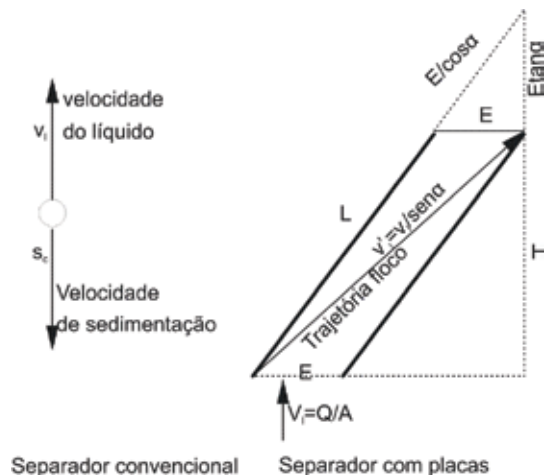


Figura 2 – Representação do mecanismo de sedimentação num separador convencional (esq.) e com placas paralelas (dir.).

corre uma distância $L + E/\cos\alpha$, a partícula sedimenta a uma distância máxima de $E\tan\alpha$ para ser capturada. Se a espessura das placas for desprezada, a velocidade do líquido no espaço entre as placas poderá ser expressa como:

$$v'_1 = v_l / \sin\alpha \quad (2)$$

Portanto, a razão entre a velocidade crítica de sedimentação de uma partícula para retenção na placa e a velocidade do líquido nas placas é:

$$s'_c / v'_1 = E \tan\alpha / (L + E/\cos\alpha) \quad (3)$$

Em que:

- v'_1 = velocidade do líquido entre as placas;
- s'_c = velocidade crítica de sedimentação na zona com placas;
- α = ângulo das placas paralelas;
- L = comprimento das placas;
- E = espaçamento entre as placas.

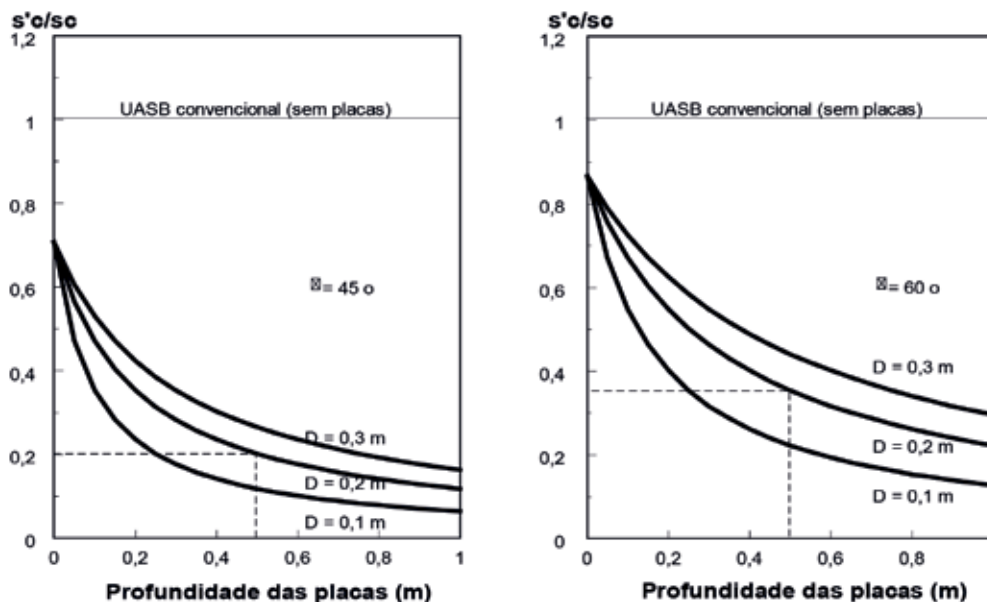


Figura 3 – Razão entre as velocidades críticas de sedimentação dos flocos em reatores UASB com separador de fases com placas paralelas e com separador convencional em função da profundidade das placas para espaçamentos e ângulos diferentes.

Portanto:

$$s'_c = v_f \tan \alpha / (L + E / \cos \alpha) = (v_f \sin \alpha) \tan \alpha / (L + E / \cos \alpha)$$

$$s'_c / s_c = [(v_f \sin \alpha) \tan \alpha / (L + E / \cos \alpha)] / s_c = 1 / [(L/E) \cos \alpha + 1] \quad (4)$$

A Equação 4 mostra que a razão entre a velocidade mínima que pode ser retida num separador com placas (s'_c) e num separador convencional (s_c) – que é uma indicação da eficiência das placas – depende de três fatores: (a) a distância entre as placas; (b) o ângulo das placas; e (c) a altura da zona das placas. Esses três fatores são limitados por considerações de ordem prática: (1) a distância entre as placas não pode ser muito pequena, para evitar entupimentos; (2) as placas devem ter um ângulo mínimo para garantir que os flocos de lodo sedimentados deslizem facilmente de volta à zona de digestão (na prática, de 45° a 60°) (VALENCIA, 2000); e (3) por razões econômicas, a profundidade da zona de placas paralelas não pode

ser muito grande, isto é, o comprimento das placas também não pode ser muito grande.

A Figura 3 mostra a razão s'_c / s_c como uma função da profundidade H da zona com placas para os ângulos de 45° e 60°. Os índices foram calculados para três espaçamentos entre as placas: E = 0,1; 0,2; e 0,3 m. Os resultados mostram que, para valores práticos de E, α e H, a teoria prevê uma grande diferença entre as velocidades de sedimentação das partículas que podem ser retidas no reator com placas paralelas e no reator convencional. Por exemplo, com placas a uma distância de 0,20 m, colocadas num ângulo de 45° e profundidade de 0,50 m, a velocidade de sedimentação dos flocos que podem ser retidos no reator é um fator de apenas 0,20 = 1/5 da velocidade mínima de sedimentação dos flocos que podem ser retidos no reator UASB com um separador convencional.

Equivalentemente, é possível aumentar a carga hidráulica de um reator equipado com placas paralelas e manter a mesma eficiência de retenção

dos flocos, o que não é possível obter com tanto êxito no caso de reatores apenas com um separador convencional. É importante notar que **não** é possível aumentar o fluxo de esgoto proporcional à razão s_c/s'_c , porque, assim, a carga orgânica e, conseqüentemente, a produção de lodo também aumentariam e a idade do lodo diminuiria.

Na Figura 3b, pode ser visto que, para o mesmo espaçamento e profundidade considerados no exemplo anterior, mas com um ângulo de 60°, a proporção s'_c/s_c é de 0,30, de modo que, nesse caso, a proporção é menor que no caso apresentado para 45°. Portanto, menos partículas serão mantidas, mas, por outro lado, o lodo sedimentado vai deslizar mais facilmente de volta para a zona de digestão. Nas considerações anteriores, supõe-se tacitamente que as partículas de lodo retidas irão formar flocos maiores na camada de lodo depositado, antes de deslizar de volta para a zona de digestão. Se essa floculação não ocorrer, então todas as partículas com velocidade de sedimentação abaixo do valor s_c eventualmente sairão do reator UASB, com o efluente.

METODOLOGIA

A investigação experimental foi realizada utilizando dois reatores em escala-piloto, tendo os reatores UASB a mesma geometria (volume de 1,2 m³). Este trabalho teve o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de placas paralelas sobre o separador de fases no desempenho do reator UASB. O primeiro reator (A) tinha um separador de fases convencional e o segundo (B) foi equipado com placas paralelas adicionais – um esboço do reator B está na Figura 4. Os reatores UASB foram alimentados com uma vazão constante de esgoto municipal bruto, retirado do emissário da rede de esgoto da cidade de Campina Grande (PB), Brasil.

A zona de digestão dos reatores era formada por dois anéis de concreto interligados, com altura de 1 m cada e diâmetro de 0,80 m. O separador de fases convencional foi feito em fibra de vidro

e inserido na seção quadrada de alvenaria acima dos anéis que formavam a zona de sedimentação. No reator B, na parte acima do separador de fases convencional, havia placas paralelas, também feitas em fibra de vidro, com largura de 0,5 m (profundidade de 0,35 m), e colocadas em um ângulo de 45°, com um espaçamento de 0,07 m.

Os reatores foram operados sob condições idênticas. O tempo de retenção de líquido foi variado entre 1,5 e 12 horas. Depois de impor um determinado tempo de retenção, os reatores foram operados por um período superior a dois meses, necessário para a coleta dos dados experimentais e para que o lodo se adaptasse às condições operacionais. Os aspectos avaliados foram: (1) estabilidade operacional; (2) eficiência de remoção de matéria orgânica; e (3) produção e composição do lodo. Com relação à estabilidade operacional do reator, avaliaram-se o pH do efluente, a alcalinidade total (Alc_t) e os Ácidos Graxos Voláteis (AGVs).

Para as características do esgoto em Campina Grande (Alc_t ≈ 350 mgCaCO₃/L, DQO < 600 mg/L e T > 25 °C), o índice de tamponamento foi sempre suficiente para manter o pH no intervalo neutro de 6,8 a 7,1, sem adição de qualquer material auxiliar. Destaca-se também que a metanogênese foi sempre eficiente e a concentração de AGVs no efluente nunca excedeu 1 mmol/L (60 mgHAc/L), sendo geralmente inferior a 0,5 mmol/L. Esse comportamento foi constatado para ambos os reatores e para toda a faixa de tempos de retenção investigada. Como consequência, a estabilidade operacional foi excelente durante toda a investigação, sem risco de azedamento.

Ambos os reatores foram operados sem descarga intencional de lodo de excesso, de modo que, depois que a massa máxima de lodo se estabeleceu, a taxa de descarga de lodo de excesso foi igual à taxa de produção de lodo no reator. Ademais, os reatores foram operados com vazões constantes e os dados experimentais foram coletados apenas depois que

a massa de lodo máxima foi atingida para cada um dos tempos de retenção de líquido investigados.

Quanto à fração sedimentada de Sólidos Totais Suspensos (STSs), considerou-se que todos os sólidos que sedimentavam em um cone Imhoff durante 30 minutos eram partículas de lodo e que a DQO residual do líquido sobrenadante era a DQO verdadeira do efluente.

Por essa razão, tanto a DQO bruta quanto a sedimentada do efluente foram determinadas. A diferença entre os dois valores da DQO efluente foi utilizada para estimar a DQO do lodo no efluente e, conseqüentemente, sua concentração, sabendo que a DQO de uma unidade de massa de lodo volátil é, aproximadamente, $f_{cv} = 1,5 \text{ gDQO/gSVS}$ (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999). Portanto, a concentração de lodo volátil no efluente foi calculada como:

$$X_{ve} = (S_{re} - S_{se}) / 1,5 \quad (5)$$

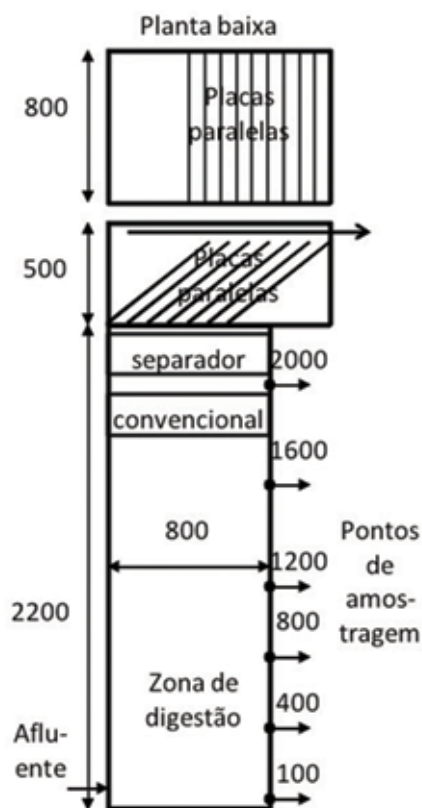


Figura 4 – Representação esquemática do reator UASB com placas paralelas usado na investigação experimental (valores em mm).

Em que:

- X_{ve} = concentração de lodo volátil no efluente;
- S_{re} = concentração da DQO bruta;
- S_{se} = concentração da DQO decantada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta, em função do tempo de retenção de líquido (R_h), as concentrações de DQO do afluente, do efluente bruto (S_{re}) e decantado (S_{se}), bem como as concentrações de AGVs para os reatores A e B. Na Tabela 2, a massa de lodo e sua composição, em termos de gSST/L, e a fração volátil também são apresentadas. A massa de lodo (total e orgânica) foi calculada a partir dos perfis linearizados da concentração, utilizando as concentrações de lodo nos pontos de amostragem (Figura 4). A produção de lodo volátil foi estimada a partir da diferença entre as concentrações de DQO do efluente bruto e do efluente decantado (Equação 5). A idade do lodo foi calculada como a razão entre a massa de lodo volátil no reator e a produção diária encontrada no efluente, quando os reatores operavam sob condições estacionárias.

Os dados apresentados na Tabela 1 podem ser usados para calcular as frações da DQO afluente transformada nas seguintes frações: (1) DQO no efluente (Equação 6); (2) DQO no lodo de excesso (Equação 7); e (3) DQO digerida (Equação 8).

$$mS_e = S_{se} / S_{ta} \quad (6)$$

$$mS_x = (S_{re} - S_{se}) / S_{ta} \quad (7)$$

$$mS_d = 1 - mS_e - mS_x \quad (8)$$

Em que:

- mS_e = fração da DQO no efluente;
- mS_x = fração da DQO convertida em lodo volátil;
- mS_d = fração da DQO digerida;
- S_{ta} = DQO do afluente;
- S_{re} = DQO do efluente bruto;
- S_{se} = DQO do efluente decantado.

Tabela 1 – Concentrações da DQO do afluente (S_{ta}), do efluente bruto (S_{re}) e decantado (S_{se}) e dos AGVs no efluente para diferentes valores do tempo de retenção hidráulico (R_h), no reator UASB convencional (A) e na unidade com separador melhorado (B).

R_h (h)	Concentrações da DQO (mg/L) e dos AGVs (mgHAc/L)						
	Afl. (S_{ta})	Reator A (sem placas)			Reator B (com placas)		
		Efl. bruto (S_{re})	Efl. decantado (S_{se})	VFA	Efl. bruto (S_{re})	Efl. decantado (S_{se})	VFA
12	587	157	88	18	155	86	26
10	492	143	78	22	139	84	20
8	554	189	108	18	163	80	23
6	480	186	102	24	172	92	28
4	526	252	133	38	166	85	45
3	619	360	195	73	236	134	87
2	561	454	236	97	304	167	78
1,5	613	-	-	-	386	215	69

Tabela 2 – Concentração média de lodo (gSTS/L), fração volátil (FV) e idade do lodo (R_s , dias), como função do tempo de retenção hidráulico (R_h) para reatores A e B.

R_h	Concentração, composições e idade do lodo					
	Reator A			Reator B		
	gSTS/l	FV	R_s	gSTS/l	FV	R_s
12	20,6	0,54	122	36,6	0,56	205
10	18,0	0,57	98	29,7	0,58	155
8	16,1	0,58	58	27,0	0,57	120
6	16,0	0,61	44	19,7	0,57	64
4	17,5	0,65	21	28,2	0,61	47
3	16,9	0,67	13	25,4	0,61	28
2	14,6	0,68	6	23,7	0,63	17
1,5	-	-	-	28,8	0,68	11

A Figura 5a mostra os valores experimentais da fração da DQO afluente que foi encontrada no efluente decantado e da fração descarregada como lodo de excesso no reator A (com separador convencional), em função do tempo de permanência. A Figura 5b apresenta as mesmas variáveis para o reator B (com placas paralelas). A partir dos dados da Figura 5 (ou das Tabelas 1 e 2), construiu-se a Figura 6a, que mostra, em função do tempo de permanência, as frações da DQO no efluente (mS_e), convertida em lodo (mS_x) e digerida (mS_d), calculadas a partir dos dados das Tabelas 1 e 2 (ou Figura 5), utilizando as Equações 6 a 8, para os reatores A e B.

A fração efluente é traçada para baixo a partir do topo do diagrama. A fração digerida não foi medida, mas, na verdade, calculada pela Equação 8 como unidade menos a fração do efluente (no topo) e a fração no excesso de lodo (na base). Na base desses dados experimentais, as curvas empíricas foram

traçadas para as frações de material orgânico em função do tempo de retenção de líquido para os dois reatores. Nota-se claramente que ambas as frações (mS_e e mS_x) aumentam na medida em que o tempo de retenção de líquido diminui. Esses resultados mostram-se contrários ao objetivo dos sistemas de tratamento anaeróbio, qual seja, transformar o material orgânico em metano; portanto, essas frações devem ser mínimas.

As curvas também indicam uma forte influência do separador de fases no desempenho do reator UASB, em termos de eficiência do tratamento. Para a mesma fração da DQO digerida, o tempo de retenção desejado no reator com o separador melhorado (B) é cerca de metade do valor necessário no reator com separador convencional (A). Assim, a introdução das placas paralelas no reator B levou a uma duplicação da sua capacidade

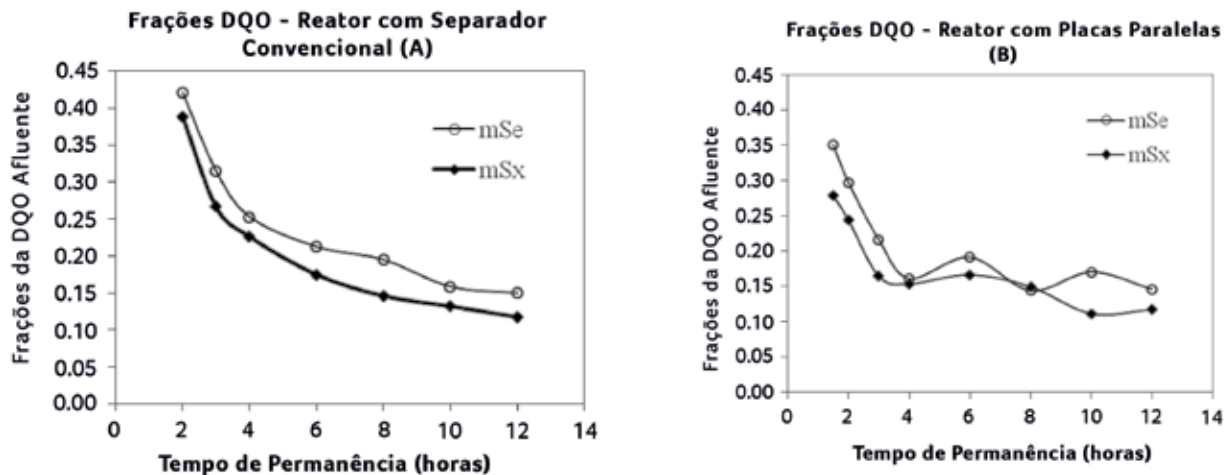


Figura 5 – Fração da DQO do afluente descarregada no efluente (mSe) e no lodo de excesso, em função do tempo de permanência do líquido no UASB com separador convencional (a) e com separador provido de placas paralelas (b).

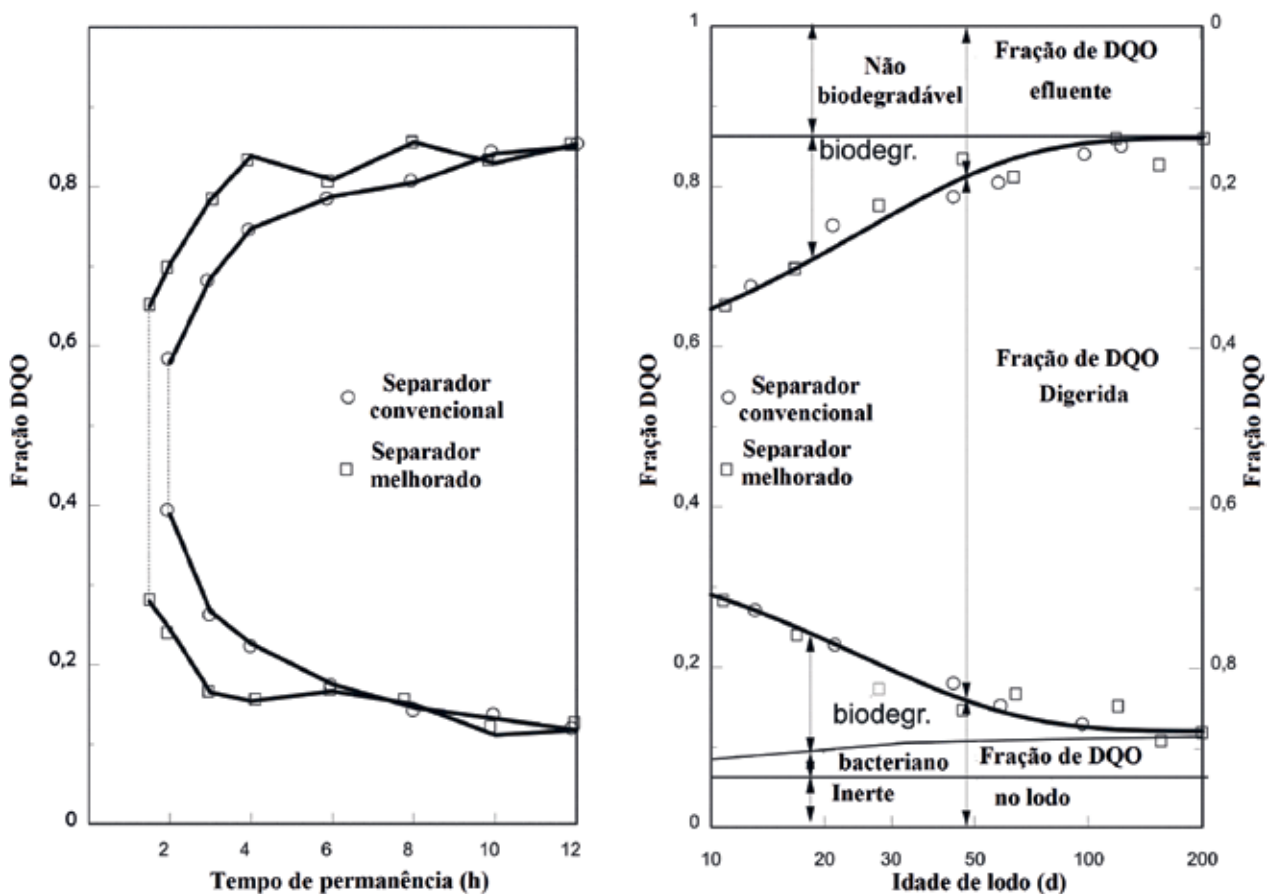


Figura 6 – (a) Frações da DQO no efluente, no lodo de excesso e digerida como função do tempo de retenção hidráulica (Rh) nos reatores A e B; (b) frações da DQO em função da idade do lodo (Rs) nos reatores A e B (escala logarítmica).

volumétrica de tratamento e deve, portanto, ser considerada uma excelente providência.

Os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 também podem ser utilizados para representar graficamente as três frações da DQO em função da idade do lodo, como é mostrado na Figura 6b (escala logarítmica na abscissa). Se a idade do lodo é utilizada como variável independente, as frações de DQO mS_e e mS_x dos reatores A e B, em boa aproximação, podem ser descritas com uma única curva. Isso significa que, para uma determinada idade do lodo, as frações da DQO afluente, descarregada no efluente ou convertida em lodo (e, conseqüentemente, também a fração digerida) são sempre as mesmas, independentemente da concepção do separador de fase ou do tempo de retenção de líquido que é aplicado. Conclui-se que a idade do lodo, e não o tempo de retenção de líquido, é o parâmetro pertinente para descrever o desempenho do reator UASB para o tratamento de águas residuais sob condições específicas (características de temperatura, esgotos etc.).

As Figuras 6a e 5b revelam também que, para os dois reatores, há valores mínimos de tempo de retenção de líquido e de idade do lodo, abaixo dos quais a metanogênese não ocorre; conseqüentemente, todo o material orgânico deixa o reator, ou no efluente, ou como material floculado no lodo de excesso. O tempo de retenção de líquido mínimo depende da eficiência do separador de fases; já o valor mínimo da idade do lodo depende da taxa de crescimento máximo específico da metanogênese, que, por sua vez, depende da temperatura, entre outros fatores.

As seguintes expressões empíricas foram encontradas por tentativas e erros, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 e na Figura 6b:

$$mS_e = 0,14 + 0,25 \exp[-0,04(R_s - 6)] \quad (9)$$

$$mS_x = 0,12 + 0,20 \exp[-0,04(R_s - 6)] \quad (10)$$

Portanto:

$$mS_d = 1 - mS_e - mS_x = 0,74 - 0,45 \exp[-0,04(R_s - 6)] \quad (11)$$

As equações mostram claramente que a eficiência da digestão anaeróbia de material orgânico em esgoto aumenta com a idade do lodo. Portanto, ao menos em princípio, é vantajoso operar o reator UASB à máxima idade do lodo.

Nas Figuras 5a e 5b e nas Equações 9, 10 e 11, transparece que a eficiência da digestão anaeróbia é maior à medida que o tempo de retenção de líquido e de sólidos é maior. Nesse aspecto, o reator UASB é diferente do sistema de lodo ativado (VAN HAANDEL; MARAIS 1999): a partir de um valor relativamente baixo da idade do lodo (em torno de cinco a sete dias), a remoção do material biodegradável é virtualmente completa. No reator UASB, é necessário que se faça uma otimização: na medida em que se aplica uma idade do lodo maior, a eficiência da digestão aumenta, mas o custo do investimento também cresce, porque o reator necessário se torna maior. Assim, tem de ser ponderado o benefício de uma maior eficiência de tratamento contra um maior custo de investimento.

Infelizmente, ainda não é possível estimar, *a priori*, a idade do lodo num reator UASB sob determinadas condições operacionais. A massa de lodo retida não depende apenas do projeto do separador de fases, mas também das propriedades mecânicas do lodo que se desenvolve, em particular, sua velocidade de sedimentação. Essas propriedades dependem das condições operacionais no reator, bem como das características do afluente. A teoria ainda não está suficientemente desenvolvida para dar uma estimativa da velocidade de sedimentação do lodo do reator UASB para tratamento de esgotos.

Tendo em vista as Equações 5, 6 e 7, a partir dos dados experimentais (Tabelas 1 e 2), avaliou-se que sua validade é limitada às configurações dos

reatores, às condições de operação (temperatura média de 25 °C) e às características do esgoto durante a investigação experimental.

A Figura 5b também é muito útil para a avaliação da composição das frações de DQO presentes no efluente e convertidas em lodo. Marais e Ekama (1976) dividem o material orgânico (DQO) do afluente em uma fração biodegradável e uma fração não biodegradável, cada uma com um componente solúvel e um componente particulado. O material não biodegradável não é sujeito à ação metabólica dos microrganismos e sai inalterado do sistema de tratamento, relativo à fração solúvel no efluente e à fração particulada no lodo de excesso após flocculação. Assim, as frações não biodegradáveis da DQO afluente f_{us} e f_{up} são definidas como as frações não biodegradáveis da DQO afluente solúvel e particulada, respectivamente.

Para idades do lodo muito longas, pode-se supor que o material biodegradável é completamente utilizado pelas bactérias, de modo que o efluente se compõe apenas de material não biodegradável e solúvel (seção superior indicada na Figura 4b), que, no caso, representa uma fração de $f_{us} = 0,12$. Para idades do lodo mais curtas, existe um aumento progressivo da presença de material biodegradável no efluente, que pode ser dividido em uma parte constante de material não biodegradável e outra variável de material biodegradável. Quanto à natureza do material biodegradável no efluente durante a investigação, é interessante notar que a metanogênese permaneceu eficiente para idades do lodo muito curtas, de somente seis dias (Tabela 1). A concentração média de AGVs permaneceu quase sempre inferior a 60 mg/L. Portanto, o aumento da concentração de DQO biodegradável para idades do lodo mais curtas deve ser atribuído à ineficiência dos processos preparatórios da metanogênese: hidrólise, acidogênese e acetogênese.

Por outro lodo, na Figura 5b, a fração da DQO convertida em lodo aumenta fortemente com a re-

dução da idade do lodo. O lodo em reatores UASB se compõe basicamente de três componentes: (1) lodo inerte, resultado da flocculação do material não biodegradável e particulado; (2) material biodegradável particulado e ainda não hidrolisado; e (3) lodo microbiano, com populações de bactérias e arqueias atuantes nos diferentes processos que se desenvolvem no reator. Quando a idade do lodo diminui, tanto a digestão anaeróbia do material orgânico afluente (catabolismo) quanto o crescimento bacteriano (anabolismo) diminuem. Isso significa que, à medida que a idade do lodo diminui, uma fração crescente da DQO afluente é descarregada como material biodegradável particulado e flocculado, que ainda não foi afetado pela hidrólise e, por conseguinte, não ficou disponível para nenhum dos processos complementares.

Os dados experimentais podem ser utilizados para estimar a fração das partículas não biodegradáveis da DQO afluente e o coeficiente de rendimento global aparente. Na Figura 5b, pode-se notar que a fração da massa bacteriana no lodo produzido para curtas idades do lodo é pequena em comparação com a fração biodegradável. Portanto, a qualidade do lodo medida como fração dos sólidos voláteis que podem ser transformados em biogás se deteriora na medida em que a idade do lodo diminui.

É questionável se o lodo de excesso para uma idade do lodo curta pode ser considerado estável; a Agência Ambiental Americana (EPA, 1992) entende que o lodo é estável quando a fração dos sólidos voláteis que se transforma em biogás é menor que 17%. A Figura 5b indica que a fração biodegradável (e, portanto, sujeita à digestão anaeróbia) para idades do lodo curtas é bem maior que 17% nos três componentes que formam os sólidos voláteis. Conclui-se que é importante que se mantenha uma idade do lodo longa em sistemas de tratamento anaeróbio de águas residuais, porque só assim se pode obter uma conversão eficiente do material orgânico do afluente.

A idade do lodo no reator UASB depende principalmente da eficiência de retenção do lodo pelo separador de fases. Esta, por sua vez, depende da sua geometria (declividade dos elementos do separador e do defletor) e eventuais peças auxiliares, como as placas paralelas inseridas no reator estudado no presente artigo. O número de elementos separadores também é importante, uma vez que determina a divisão do volume entre a zona de digestão e a zona de sedimentação. Ademais, a idade do lodo é limitada pelo custo do investimento, mas não se sabe exatamente qual seria a idade ótima, uma vez que depende de um conjunto de fatores que são parcialmente conhecidos, entre os quais: a geometria do separador de fases, a temperatura, a composição do material orgânico e a velocidade de sedimentação do lodo.

CONCLUSÕES

- 1) A idade do lodo é o parâmetro fundamental para descrever o desempenho do reator UASB para o tratamento de águas residuais e, em particular, a divisão da DQO afluyente em três frações: (a) descarregada no efluente; (b) convertida em lodo; e (c) digerida para metano. Quanto menor ela for, maiores serão as frações da DQO afluyente descarregada no efluente ou no lodo de excesso e menor, a fração digerida.
- 2) A idade do lodo é fortemente dependente da eficiência do dispositivo de retenção de sólidos do reator UASB. A aplicação de placas paralelas, em adição a um separador de fases convencional, para formar uma decantação

de alta taxa mostrou-se muito eficaz para aumentar a retenção de lodo. Na presente investigação, sua aplicação num reator UASB piloto (placas a 45°, com profundidade de 0,35 m e espaçamento de 0,07 m) efetivamente dobrou a capacidade de tratamento do reator.

- 3) A adoção da idade do lodo ótima traz consigo o seguinte dilema: com idade do lodo longa, prevalece a elevada eficiência de digestão no sistema de tratamento; em contrapartida, o custo de investimento é muito elevado, uma vez que, para comportar uma quantidade maior de lodo, se necessita de um reator bem maior.
- 4) A redução da eficiência dos processos de preparação (hidrólise, acidogênese e acetogênese), em vez da metanogênese em si, é a causa da deterioração do desempenho dos reatores UASB quando se reduz a idade do lodo.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, J. R. C., Ed. (1999). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro, ABES-RJ. 464.
- EPA (1992). **Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. Washington, DC, U.S. Environmental Protection Agency: 152.
- MARAIS, G. v. R. and EKAMA, G. A. (1976). **The activated sludge process part I: steady state behaviour**. Water S.A. 2: 163-200.
- VALENCIA, J. A. (2000). **Teoría y práctica de la purificación del agua**. Santa Fe de Bogotá D.C. - Colombia, McGraw-Hill. 362.
- VAN HAANDEL, A. and LETTINGA, G. (1994). **Anaerobic sewage treatment - a practical guide for regions with a hot climate**. Chichester, UK, John Wiley & Sons, Inc.. 226.
- VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do Sistema de lodo ativado**, Nº ISBN 900 847. Campina Grande, PB. 1999