

## DESEMPENHO DE UM REATOR AERÓBIO DE LEITO PERFORMANCE OF A FLUIDIZED BED AEROBIC

Dib Gebara<sup>1</sup>  
Pedro Alem Sobrinho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Civil. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Doutor em Engenharia Hidráulica pela Escola Politécnica (USP). Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

**Endereço:** Alameda Bahia, 550 - Ilha Solteira - São Paulo – 15.385-000 - Fone (Fax) (018) 3743-1137. e-mail: dib@dec.feis.unesp.br

### RESUMO

Apresentam-se resultados do tratamento de esgoto sanitário, submetido apenas a peneira estática, com reatores aeróbios de leito trifásico com circulação em tubos concêntricos. Com 0,25m de diâmetro externo e 0,20m interno e alturas de 6m (R6) e 12m (R12), os reatores utilizaram areia como meio suporte em concentrações de 50 e 100g/l. Os melhores resultados foram obtidos com TDH = 3h e 100g/l de areia. As remoções médias de DBO bruta, e filtrada, DQO bruta e filtrada e NTK foram de 89%, 99%, 84%, 95% e 87%, respectivamente, para o R12 e de 89%, 98%, 82%, 95% e 86%, respectivamente, para o R6. SS de baixa sedimentabilidade prejudicaram a qualidade do efluente. Soluções ensaiadas incluíram uma câmara de flotação, testada no R12 e tubo interno de 0,10m no R6. A solução de leito trifásico com circulação, integrada a flotores, é tecnicamente viável se for adicionado floculantes.

### ABSTRACT

There are presented results of sanitary sewage treatment, submitted only to static screening, using three-phase bed aerobic reactors with circulation in concentric tubes. With 0.25m of external diameter, 0.20m internal, and 6m (R6) and 12m high (R12), the reactors used sand as support medium in concentrations of 50 g/l and 100 g/l. The best results were obtained with HDT = 3h and 100g sand/l. The removal of rough and filtered BOD, rough and filtered COD, and TKN for the R12 were 89%, 99%, 84%, 95%, and 87%, respectively. For the R6 the values were 89%, 98%, 82%, 95%, and 86%. It was produced a low sedimentability portion of SS, prejudicing the effluent quality. Alternatives investigated were a flotation chamber (R12) and reduction of the internal tube to 0,10m (R6). The triphasic bed with circulation solution, integrated to flotation systems, is technically feasible with flocculants addition.

**Palavras-chave:** Biofilme, Leito Fluidizado, Air-lift, Nitrificação, SOTE, SOTR.

**Keywords:** Biofilm, Fluidized bed, Air-lift, Nitrification, SOTE, SOTR.

### INTRODUÇÃO

Os reatores de leito fluidizado são constituídos na maioria dos casos de tubos concêntricos, também chamados de internal-loop ou podem ser confeccionados em tubos paralelos, constituindo-se assim os reatores com circulação externa ou external-loop.

A utilização desta técnica permite tratar um grande volume de esgoto, com baixa produção de lodo, devido à formação de um biofilme em volta de pequenas partículas suspensas (por exemplo areia), com a vantagem adicional de ser um sistema compacto de tratamento. Neste contexto se incluiu o presente trabalho, que visa desenvolver um reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos para o tratamento de esgoto sanitário submetido apenas a peneiramento prévio, num sistema único e compacto.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A proposta tecnológica apresentada neste trabalho utiliza biofilmes fixos aderidos ao redor de pequenas partículas sólidas mantidas em suspensão por jatos de ar.

Segundo Nicoletta et al.(2000a), o biofilme pode ser definido como uma estrutura complexa de células e produtos extra celulares, como polímeros, no qual formam-se espontaneamente grânulos densos ou crescem aderidos a uma superfície sólida estática ou ainda em uma superfície sólida suspensão.

A profundidade da penetração do substrato no biofilme depende da porosidade, concentração do substrato, da taxa de transferência de massa na interface líquido-biofilme e líquido-flocos e da taxa de reação dos microrganismos (Nicoletta et al, 2000a).

Os compostos são adsorvidos à superfície do biofilme, sendo em seguida transportados por difusão. Com base nisso Hagedorn-Olsen et al. (1994) propõem um perfil idealizado de um biofilme aderido com uma região aeróbia na camada mais externa do biofilme e uma anaeróbia - anóxica na camada mais interna. A ocorrência dessas 3 camadas depende da espessura do biofilme, que é fortemente influenciada pelas condições de fluxo do reator.

Iwai e Kitao (1994) apresentam o mesmo tipo de perfil com relação à concentração de nitrogênio através do biofilme. A coexistência das duas regiões anaeróbia e aeróbia é conveniente para a remoção biológica de nitrogênio. A eficiência no processo de nitrificação e desnitrificação dependerá da concentração de oxigênio no meio líquido e da espessura do biofilme. Iwai e Kitao (1994) argumentam que deve existir uma concentração ótima de oxigênio no meio líquido para promover a máxima remoção de nitrogênio.

A formação do biofilme é fortemente influenciada pelas condições hidrodinâmicas dos reatores, alterando sua espessura e massa específica. O fluxo turbulento garante uma maior interação entre as partículas por meio do atrito, ocasionando o controle da espessura e melhorando a condição do transporte de nutrientes às regiões mais profundas.

De acordo com vários autores (Nicolella et al., 2000a, Mendonça, 2004 e Stronach et al., 1986) a faixa de tamanho de partícula empregada nesses reatores situa-se entre 0,1 e 3,0mm. É importante mencionar ainda que, apesar de as partículas menores proporcionarem baixo custo de energia para atingir-se o regime de fluidificação, elas ocasionam condições operacionais no reator um tanto difíceis de serem controladas, em virtude de causarem instabilidade no leito (Marin et al., 1998, apud Mendonça, 2004).

O difícil controle da espessura do biofilme é apontado como sendo uma desvantagem na operação com reatores do tipo expandido/fluidizado. Nos reatores com circulação conseguida por meio de jatos de ar, o controle desta espessura se mostra possível, resultando em biofilmes densos, conforme Heijnen et al. (1990).

Quanto à operação de reatores deste tipo no Brasil, pode ser citado o trabalho de Furtado et al. (1998), com resultados da operação de um reator de leito fluidizado em tubos concêntricos, com 5l, alimentado com efluente secundário da estação de tratamento de esgotos de refinaria de petróleo. Os TDHs de 8 e 10 horas foram capazes de reduzir as concentrações de nitrogênio amoniacal para menos que os limites legais permitidos, de 5mg/l. Ocorreu ainda uma pequena diminuição da DBO, associada pelos autores ao crescimento preferencial da população microbiana nitrificante, em detrimento das heterotróficas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Descrição dos reatores e condições de ensaio

A investigação experimental foi realizada em Ilha Solteira, junto a uma estação elevatória de esgoto. Foram construídos dois reatores com 0,25m de diâmetro externo e alturas de 6 e 12 metros, respectivamente. Os reatores foram identificados por uma sigla contendo a altura e a configuração de diâmetro externo e interno em milímetros. Foram ensaiados os reatores identificados por R6:250-200 e R12:250-200, bem como o R6:250-100.

O esgoto utilizado foi retirado do poço de sucção da estação elevatória, passando após por uma peneira estática com aberturas de 1mm e aduzido até a uma caixa superior, que alimenta uma bomba peristáltica para controle da vazão afluente ao R12. O excesso deste esgoto

foi para uma segunda caixa dotada do mesmo mecanismo que alimenta o R6.

As concentrações de areia utilizadas foram de 50g/l, com TDHs de 4h e 8h e 100g/l, com TDHs de 8h, 6h, 4h, 3h e 2h. No R6:250-100 foi ensaiado apenas o TDH de 3h com 100g/l de areia.

Os reatores utilizaram injetores de ar construídos em PVC, de forma cilíndrica, com um diâmetro de 40mm, perfurados em 6 carreiras de 36 furos de 1mm diâmetro, com espaçamento de cerca de 3mm entre os furos. Nos períodos iniciais de formação do biofilme houve a necessidade dos reatores operarem com vazões de ar da ordem de 5000 a 5500 l/h para manter o meio suporte em suspensão. Após a formação do biofilme as vazões foram diminuídas, para 2800 l/h na configuração 250-200 e 2100 l/h na configuração 250-100. Os volumes dos reatores são 0,258m<sup>3</sup> (R6) e 0,552m<sup>3</sup> (R12).

Devido a ocorrência de uma parcela de sólidos em suspensão de difícil sedimentação nos decantadores, prejudicando a qualidade do efluente final, sendo este um problema relatado na literatura, Nicolella et al. (2000a, 2000b), foi proposta uma câmara de flotação para minimizar os sólidos suspensos no efluente. Essa configuração foi estudada com TDH=3h e 100g/l de areia, com taxas de recirculação de 15% e 20% no R12. As séries de dados obtidas com essa configuração são identificadas com a sigla 3-100F15 e 3-100F20.

### Transferência de Oxigênio

Os ensaios para determinação do  $K_L a$  foram realizados com água limpa e diversas concentrações de areia. Para isso utilizou-se um medidor portátil de oxigênio dissolvido marca HANNA Instruments - HI 9141. A determinação seguiu a metodologia para água limpa, método não estacionário, recomendada pela ASCE (1990).

Conforme método recomendado pela ASCE (1990), pode-se determinar o fluxo de massa de oxigênio transferido pelo ar para o meio líquido. Este fluxo, denominado Taxa de Transferência Padrão de Oxigênio SOTR (Standard Oxygen Transfer Rate), é calculado a partir do coeficiente de transferência global de oxigênio  $K_L a$ , e do valor da concentração de saturação de OD ( $C_\infty$ ), os quais devem ser corrigidos para a temperatura e pressão padrão, que tem valores usuais respectivamente de 20°C e 1atm.

### Determinações Analíticas Efetuadas

Foram realizadas periodicamente determinações analíticas com amostras do esgoto afluente e efluente, de acordo com o "Standart Methods for Examination

of Water and Wastwater “ (APHA, AWWA & WPCF, 1998). Diariamente foram monitoradas a concentração de oxigênio dissolvido, o pH, temperatura do ar e do esgoto, bem como foram efetuadas as medidas de vazão do esgoto e do ar.

As análises foram realizadas em média duas vezes por semana em todas as etapas de operação. Para caracterizar o esgoto afluente e determinar o horário onde ocorriam as maiores concentrações de DBO, DQO, sólidos e nitrogênio amoniacal e nitrogênio total Kjeldahl (NTK), foram realizadas campanhas 24 horas.

O esgoto afluente era coletado de hora em hora, por um período, anterior e posterior ao horário determinado nas campanhas de 24h. Para a amostra do efluente dos reatores tomava-se o cuidado de realizar as coletas decorrido o TDH do experimento.

**RESULTADOS E DISCUSSÕES**

**Resultados da Transferência de Oxigênio**

Os dados de  $K_L a$  obtidos são apresentados na figura 1(a) para o R12. Os resultados do R6 são similares. O efeito sobre o SOTR é mostrado na figura 1(b), em função da vazão de ar para água limpa e concentrações de areia de 50g/l, 100g/l e 150g/l.

A figura 1(b) indica um aumento considerável na taxa de oxigênio transferido por unidade de tempo quando é adicionada a fase sólida no reator.

A figura 2(a) apresenta o índice SAE calculado para o R12. A fração de oxigênio transferida em relação ao total disponível no ar é apresentada na figura 2(b) para o R12.

O SOTR variou de forma aproximadamente linear com a vazão de ar. Foram ajustadas equações do tipo  $SOTR(mg/s) = a.Vazão(l/h)$  obtendo-se os valores seguintes: R12 -  $a = 0,0655$ ,  $r^2 = 0,84$ ; R6-  $a = 0,0195$ ;  $r^2 = 0,46$ . Com o dobro do volume, o R12 transfere cerca de 330% do fluxo de massa por unidade de volume transferido pelo R6.

**Influência do diâmetro do tubo interno do reator**

A figura 3(a) apresenta os resultados de  $K_L a$  e a figura 3(b) apresenta a taxa padrão de transferência de oxigênio (SOTR) das duas configurações. Tendo em vista a grande diminuição na área do tubo interno, acarretando menor tempo de contato com as bolhas, pode-se considerar que a redução verificada no  $K_L a$  da configuração 250-100 não é significativa.

Este é um resultado que indica que com a redução do diâmetro interno é possível utilizar menores vazões

de ar, evitando o risco de sedimentação dos sólidos, e sem alterar significativamente as taxas de transferência de oxigênio.

A figura 3(b) permite concluir que, com a dispersão observada nos dados, os dois diâmetros de tubo interno proporcionam fluxos de massa equivalentes para uma dada vazão, podendo ser adotado um crescimento linear com a vazão de ar injetado. Da mesma forma, não se pode afirmar que os índices da eficiência padrão SAE variam de forma sensível ao se diminuir o diâmetro interno.

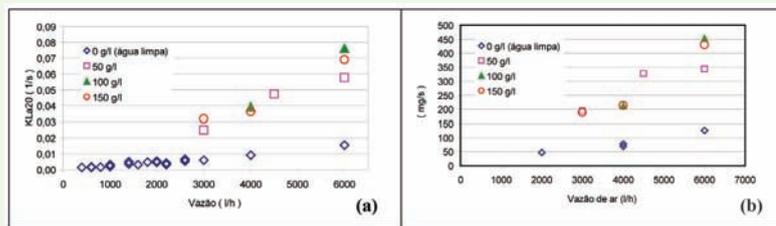


Figura 1: Efeito da concentração de areia sobre o  $K_L a$  (a) e sobre o SOTR (b) do R12

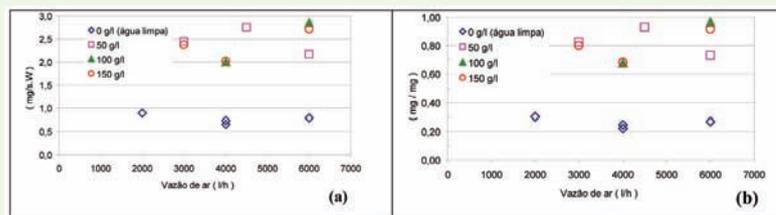


Figura 2: Efeito da concentração de areia sobre o SAE (a) e sobre o SOTE (b), no R12

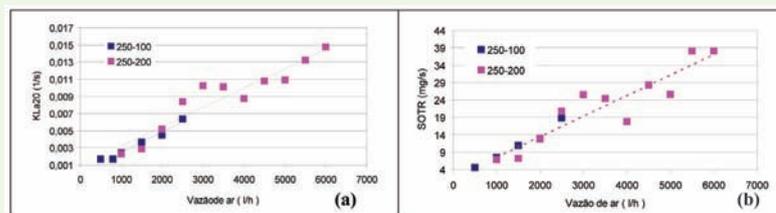


Figura 3:  $K_L a$  no R6:250-100 e R6:250-200 (a) e SOTR em função da vazão de ar (b)

### RESULTADOS DO MONITORAMENTO

As tabelas de 1 a 5 apresentam os resultados das carreiras de monitoramento em termos das médias. Os valores afluentes marcados com (\*) apresentam diferença em relação à média global significativa ao nível de confiança de 95%. Os testes do efeito da altura são apresentados nas colunas de remoções. Pares de valores marcados com (a) apresentam diferença significativa no desempenho entre o R12 e o R6, ao nível de significância de 95%.

**Tabela 1: Valores médios de DBO nas respectivas carreiras**

Série	DBOAflu (mg/l)	DBO Eflu – Bruta (mg/l)		DBO Eflu – Filtrada (mg/l)		Rem. DBO Bruta (%)		Rem. DBO Filtrada (%)	
		R12	R6	R12	R6	R12	R6	R12	R6
4-50	267	48	50	10	6	82	81	96a	98a
8-50	302	51	40	4	5	83	87	99	98
8-100	285	74	62	7	6	74	78	98	98
6-100A	315	29	32	5	4	91	90	98	99
4-100A	323*	39	34	5	4	88	89	98	99
3-100A	281	31	31	3	5	89	89	99	98
2-100A	283	57	86	7	6	80a	70a	98	98

**Tabela 2: Valores médios de DQO nas respectivas carreiras**

Série	DQOAflu (mg/l)	DQO Eflu – Bruta (mg/l)		DQO Eflu – Filtrada (mg/l)		Rem. DQO Bruta (%)		Rem. DQO Filtrada (%)	
		R12	R6	R12	R6	R12	R6	R12	R6
4-50	566	208	204	55	37	63	64	90a	93a
8-50	584	147	127	41	43	75	78	93	93
8-100	648	129	114	43	40	80	82	93	94
6-100 <sup>a</sup>	784*	138	129	46	52	82	84	94	93
4-100 <sup>a</sup>	662	98	124	34	33	85	81	95	95
3-100 <sup>a</sup>	611	100	112	32	31	84	82	95	95
2-100 <sup>a</sup>	653	133	137	42	46	80	79	94	93

**Tabela 3: Valores médios de fósforo total nas respectivas carreiras**

Série	Fósforo Total Aflu (mg-P/l)	Fósforo Total (mg-P/l)		Rem. Fósforo Total (%)	
		R12	R6	R12	R6
6-100A	11,1*	6,6	6,4	41	42
4-100A	10,0	6,4	6,7	36	33
3-100A	9,7	6,6	6,5	32	33
2-100A	9,1*	7,1	6,7	22	26

Tabela 4: Valores médios de nitrogênio total nas respectivas carreiras

Série	N. Total Aflu (mg-N/l)	N. Total (mg-N/l)		Rem. N. Total (%)	
		R12	R6	R12	R6
4-50	80,3	37	41	54	49
8-50	77,6	43	50	45	36
8-100	83,1	35	39	58	53
6-100A	88,8	27	29	70	67
4-100A	80,1	39	32	51	60
3-100A	83,1	21	23	75	72
2-100A	74,9	37	40	51	47

Tabela 5: Valores médios de sólidos suspensos nas respectivas carreiras

Série	Afluente (mg/l)			Efluente-R12 (mg/l)			Efluente-R6 (mg/l)		
	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV	SST	SSF	SSV
4-50	156	19	138	132	18	119	174	22	146
8-50	164	21	144	110	14	97	84	12	72
8-100	227	39	195	110	12	98	102	11	91
6-100A	263	36	227	237	36	201	125	19	106
4-100A	203	23	180	66	7	59	91	10	87
3-100A	143	15	129	52	5	46	50	6	45
2-100A	165	23	142	116	26	89	93	11	82

As figuras 5 e 6 resumem as características estatísticas básicas das séries de saída da DBO bruta (fig. 5) e filtrada (6) no R12 (a) e R6 (b).

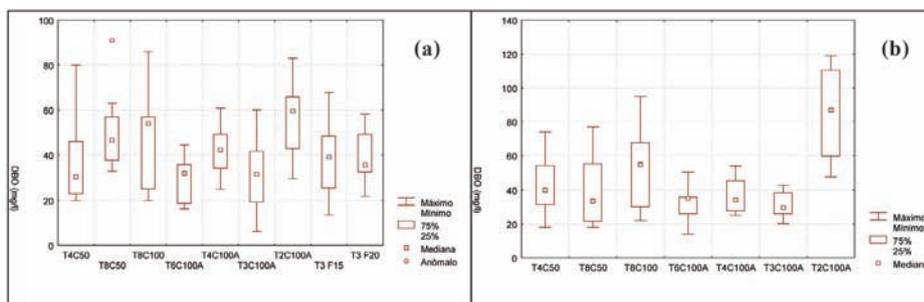


Figura 5: Características básicas das séries de DBO efluente no R12 (a) e R6 (b)

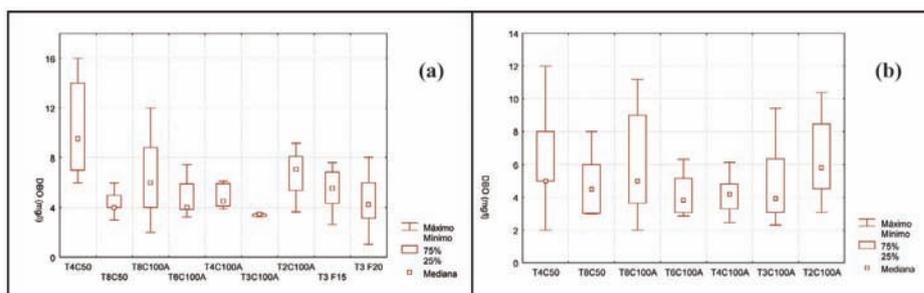


Figura 6: Características básicas das séries de DBO filtrada efluente no R12 (a) e R6 (b)

A análise da DQO na saída dos reatores não apresentou diferenças significativas ao nível de 95% entre os resultados do reator R12 e R6. As características das séries de DQO bruta efluentes são melhor visualizadas na figura 7. Com a DQO, registrou-se o mesmo comportamento observado com a DBO. O melhor resultado ocorreu com TDH = 3h.

As características das séries de DQO filtrada efluente dos reatores podem ser visualizadas nos gráficos tipo “box-plot” da figura 8.

Considerando apenas as séries de 4h, 3h e 2h, verifica-se que, apesar dos reatores já se encontrarem fora do período de aclimação, ainda ocorreu uma melhora no desempenho com a diminuição do TDH de 4h para 3h. Apenas quando a vazão foi aumentada para valores correspondentes a um TDH = 2 h o desempenho do reator voltou a piorar devido possivelmente à sobrecarga.

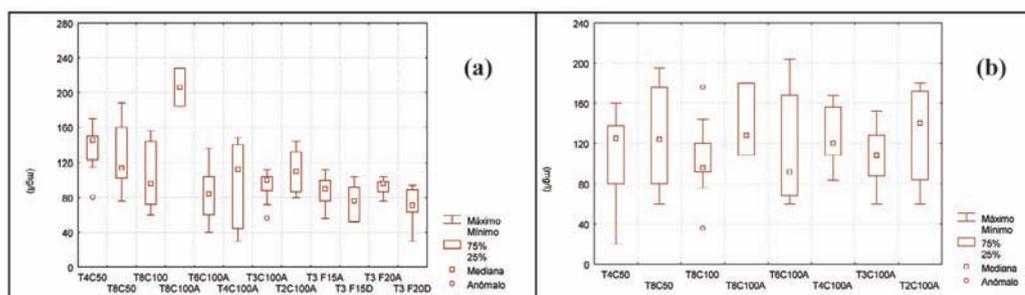


Figura 7: Características básicas das séries de DQO efluente no R12 (a) e R6 (b)

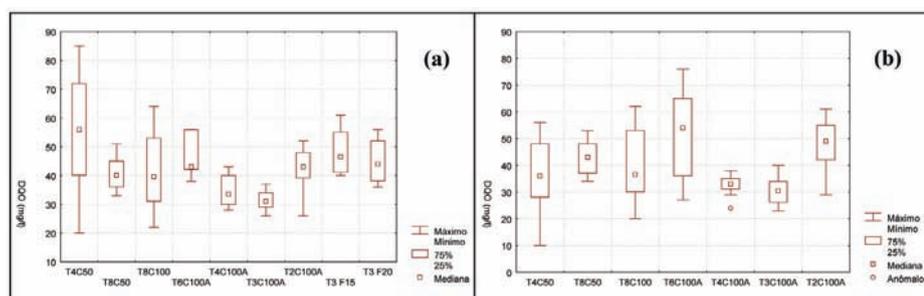


Figura 8: Características básicas das séries de DQO filtrada efluente no R12 (a) e R6 (b)

A tabela 4 mostra que a série 3-100F15% apresentou a menor média de NT afluente (73,6mg-N/l) e a maior foi a da série 6-100A (88,8mg-N/l), diferenças não significativas ao nível de 95%. A figura 9 apresenta as características das séries de NT efluente.

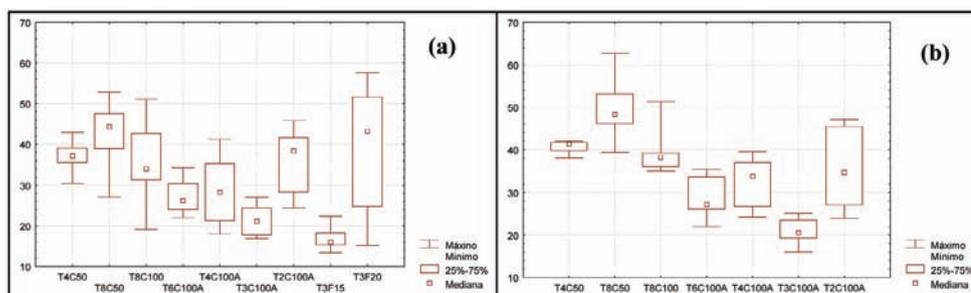


Figura 9: Características das séries de Nitrogênio Total efluente no R12 (a) e R6 (b)

### Efeito do flotor na remoção de fósforo

A tabela 6 apresenta um resumo dos resultados obtidos com TDH=3h e com 100g/l de areia, antes (série 3-100A) e após a instalação do flotor integrado (séries 3-100F15 e 3-100F20), permitindo comparar de maneira global os efeitos da instalação do flotor. A tabela mostra que a remoção de fósforo melhorou com a introdução do sistema de flotação, que se apresenta como solução viável para melhorar o desempenho deste tipo de reator.

### Efeito do diâmetro

A tabela 7 compara os resultados das configurações 250-200 e 250-100. A média amostral da DBO afluente foi ligeiramente maior durante o ensaio do R6:250-100, mas a diferença não foi significativa ao nível de 95%.

**Tabela 6: Remoção percentual do R12 com e sem flotor**

Parâmetro	Remoção Percentual			Teste de Hipóteses* Rejeita H0? **		
	Série 3 – 100A(%)	3-100F15 (%)	3 – 100F20 (%)	1x2	1x3	2x3
DBO bruta	88,8	88,4	84,7	N	N	N
DBO filtrada	98,8	98,2	98,4	S	N	N
DQO bruta	84,1	87,2	87,7	N	N	N
DQO filtrada	95,0	90,9	90,8	S	S	N
N Total	74,0	77,4	54,3	S	S	S
Nitrogênio Amoniacal	97,4	96,7	98,8	N	N	S
Fósforo Total	31,9	42,9	42,5	S	S	N
Ortofosfato	18,3	29,7	36,8	S	S	N

OBS: \* Série1 = 3-100A; Série 2 = 3-100F15; Série 3 = 3-100F-20  
\*\* Hipótese de Nulo H0 = Remoções iguais com 95% de confiança

**Tabela 7: Concentrações média obtidas nas configurações 250-200 e 250-100**

Parâmetros	A200	A100	E200	E100	Rem 200 (%)	Rem 100 (%)
DBO (mg/l)	281	306	31	35	89	89
DBO Filtrada (mg/l)			5	13	98a	96a
DQO (mg/l)	611	561	112	50	82a	91a
DQO Filtrada (mg/l)			31	31	95	94
N Total (mg-N/l)	83,1	116,0	21,0a	34,9a	-	-
Fósforo Total (mg-P/l)					33,0	46,4

O mesmo pode ser dito em relação ao efluente bruto, em que a média passou de 32mg/l para 35mg/l, diferença não significativa ao nível de 95% . No caso da DBO filtrada houve uma piora estatisticamente significativa, com a média passando de 5mg/l para 13mg/l.

As diferenças entre a DBO efluente bruta e filtrada nas duas configurações evidenciam em primeiro lugar que o sistema separador funcionou melhor na configuração 250-100 do que na 250-200, possivelmente devido a condições hidrodinâmicas mais favoráveis para limitar a espessura do biofilme na configuração 250-100. Por outro lado, essas mesmas condições, aliadas a uma menor vazão de ar, limitaram o resultado do tratamento, levando a se encontrar maiores concentrações de DBO filtrada no efluente da configuração 250-100.

As Figuras 10(a) e 10(b) permitem visualizar os comportamentos das séries de dados de DBO e DQO. A DQO efluente bruta foi mais de duas vezes maior na configuração 250-200, ao passo que a DQO efluente filtrada foi igual nas duas configurações do reator.

A configuração 250-100 apresentou bom desempenho hidrodinâmico, além de boa eficiência no tratamento, pois obteve-se regularmente um efluente bastante clarificado.

A nova relação de diâmetros do reator melhorou o comportamento de sedimentabilidade do lodo, pois como se nota na figura 10(b) o efluente bruto melhorou sensivelmente, e o filtrado manteve-se nos mesmos padrões, diminuindo assim a diferença da DQO entre os efluentes bruto e filtrado.

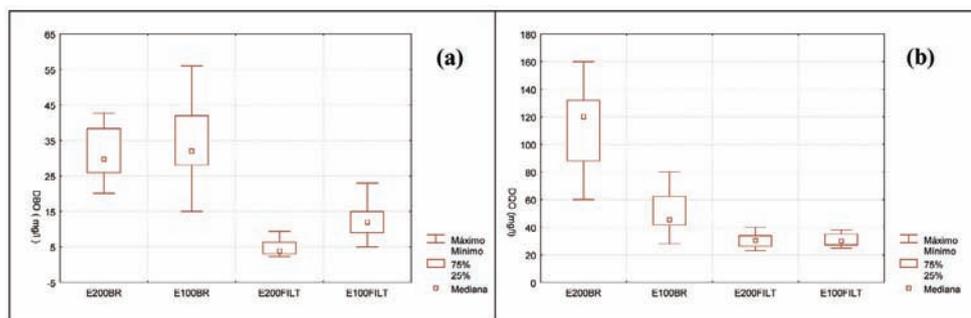


Figura 10: DBO(a) e DQO(b), bruta e filtrada efluente das duas configurações do R6

As figuras 11(a) e 11(b) apresentam o comportamento das séries de nitrogênio em suas diversas formas no afluente e no efluente das configurações 250-200 e 250-100.

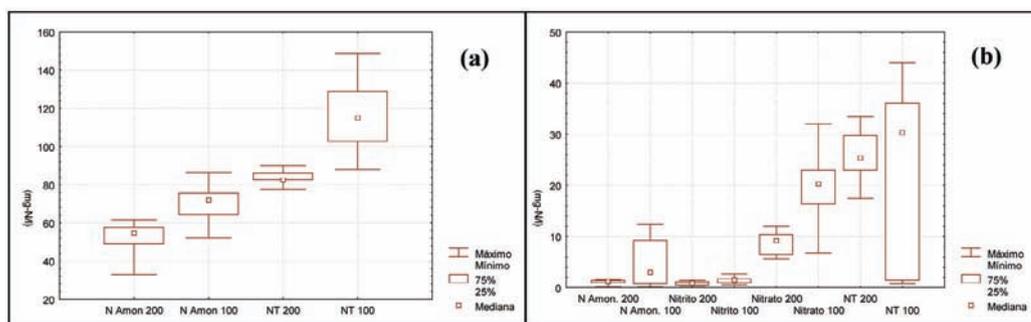


Figura 11: Dados de N amoniacal e NT afluente (a) e N amoniacal, nitrito, nitrato e NT no efluente (b) nas duas configurações de diâmetro do R6

A comparação entre as duas configurações pode ser efetuada ainda por meio da relação entre a remoção de nitrogênio total e de DBO, um índice que permite verificar a eficiência do processo de nitrogênio. Utilizando os valores de DBO e NT da tabela 7 e considerando a vazão correspondente ao TDH = 3h, chega-se, para esse índice, aos valores de  $0,239 \text{ kg-N}_{\text{Removido}}/\text{kg DBO}_{\text{Removido}}$  para a configuração 250-200 e de  $0,299 \text{ kg-N}_{\text{Removido}}/\text{kg DBO}_{\text{Removido}}$  para a configuração 250-100. Este resultado indica que houve uma melhor remoção de nitrogênio no reator 250-100.

Os sólidos foram divididos em duas partes, os sólidos totais, sendo, totais, totais fixos e totais voláteis, e os sólidos suspensos, sendo suspensos, suspensos fixos e suspensos voláteis. Os principais dados estatísticos das séries e os testes de significância para igualdade entre as médias são apresentados na tabela 8

Tabela 8: Estatísticas básicas e teste de significância das diferenças entre médias de sólidos totais, totais fixos e totais voláteis

	Sólidos Totais				Totais Fixos				Totais Voláteis			
	Afluente		Efluente		Afluente		Efluente		Afluente		Efluente	
	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100
N. Dados	11	15	11	15	11	15	11	15	11	16	11	17
Média (mg/l)	707	759	523	494	321*	402*	288	295	386	356	236	201
Desv.Pad. (mg/l)	114	46	58	35	37	33	45	41	94	34	61	44

Como visto na tabela 8 os resultados de concentrações de sólidos são bastante parecidos, podendo-se afirmar estatisticamente que somente o afluente dos sólidos totais fixos não representa amostras de uma mesma população. Novamente, o efluente da configuração 250-100 é praticamente igual ao da configuração 250-200, apesar dos sólidos totais estarem com valores bastante parecidos, a configuração 250-100 trouxe melhora quanto a este aspecto para o efluente, melhora esta percebida nos dados dos sólidos suspensos.

Na tabela 9 podem ser vistos os dados comparativos de sólidos suspensos entre as duas configurações de reatores estudadas.

Como visto anteriormente, apesar da diferença entre os valores afluentes, que são sempre maiores na configuração 250-100, os resultados de sólidos suspensos foram melhores para a nova configuração de reator, resultados significativos ao nível de 95% de confiança.

**Tabela 9: Estatísticas básicas e teste de significância das diferenças entre médias de sólidos suspensos, suspensos fixos e suspensos voláteis**

	Sólidos Suspensos				Suspensos Fixos				Suspensos Voláteis			
	Afluente		Efluente		Afluente		Efluente		Afluente		Efluente	
	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	100
Num. Dados	10	18	11	20	11	17	11	20	10	19	11	19
Média (mg/l)	136*	224*	50a	37a	15*	42*	6a	3a	122*	189*	45a	31a
Desvio Pad (mg/l)	27	38	14	17	10	15	2	3	27	31	13	14

Visualmente percebia-se um bom aspecto no efluente do reator de configuração 250-100, impressão esta confirmada pelos resultados de sólidos suspensos.

#### Comparação das Eficiências de Remoção

A tabela 10 apresenta um resumo do comportamento das duas configurações em relação a remoção, discutidas ao longo deste item.

Com relação ao nitrogênio em suas diversas formas, os resultados do R6:250-100 foram piores que os da configuração anterior. A remoção de nitrogênio amoniacal diminuiu de 98% para 93%, o NT indica remoção de 70% contra 72% anteriormente, um resultado absoluto melhor, embora não estatisticamente não significativo. As concentrações de nitrato no efluente foram cerca de 2,3 vezes maiores na configuração 250-100.

Deve-se levar em conta, na explicação dos resultados obtidos com a matéria nitrogenada, que uma menor velocidade no tubo de descida, resultante da área externa maior usada neste trabalho, favorece a existência de zonas anóxicas na fase líquida. Em contrapartida, as maiores velocidades na subida podem originar maiores tensões de cisalhamento, que podem levar a um biofilme de menor espessura. Com isso a difusão de oxigênio no interior do biofilme fica mais fácil, diminuindo a camada anóxica junto à partícula suporte.

**Tabela 10: Remoção percentual das configurações 250-200 e 250-100**

Parâmetro	Remoção 250-200 (%)	Remoção 250-100 (%)
DBO bruta	88,6	88,5
DBO filtrada	98,2	95,8
DQO bruta	81,6	91,1
DQO filtrada	94,9	94,5
Nitrogênio Total	72,0	70,0
Amônia	98,0	93,0
Fósforo total	33,0	46,4
Ortofósforo	16,6	29,2
Sólidos totais	26,0	36,0

Parâmetro	Remoção 250-200 (%)	Remoção 250-100 (%)
Sólidos totais fixos	10,3	26,2
Sólidos totais voláteis	39,0	46,1
Sólidos suspensos	63,2	85,2
Sólidos suspensos fixos	60,0	94,3
Sólidos suspensos voláteis	63,1	83,4

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do trabalho realizado podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- Para o esgoto sanitário utilizado no experimento, submetido apenas a peneira estática com abertura de 1mm, o sistema de tratamento estudado, composto de reator biológico com partículas suporte de biomassa com circulação induzida, por jatos de ar, em tubos concêntricos, com a unidade de clarificação de efluente acoplada em uma única unidade, apresentou possibilidade técnica de utilização, embora ainda sujeita a melhorias na eficiência da utilização do ar injetado e na clarificação do efluente final.
- Os melhores resultados foram obtidos com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 3h no volume de reação. Foram obtidas remoções de cerca de 90% da DBO bruta, 99% da DBO filtrada, 84% de DQO bruta, 95% da DQO filtrada, 72 % de nitrogênio total e 32% de fósforo.
- A configuração R5:250-100 resultou em melhoria nas características do efluente final em relação à 250-200 de mesma altura, indicando que o controle das condições de atrito no leito pode ser conseguido mudando as relações de áreas de subida e descida.
- A altura do reator não se mostrou estatisticamente significativa nas eficiências de remoção citadas.
- Todas as configurações ensaiadas apresentaram uma elevada nitrificação.
- As altas remoções de nitrogênio total obtidas indicam a ocorrência de desnitrificação. Esse fenômeno ocorreu com maior intensidade na configuração 250-100.
- Os melhores índices de consumo de energia, são estimados em  $1,42 \text{ kWh/kgDBO}_{\text{Aplicado}} \cdot \text{h}$ , (R6 250-100); um valor relativamente próximo aos usualmente observados em sistemas de lodos ativados com nitrificação.
- A relação ótima de áreas externa / interna do volume de reação deve situar-se próxima de 5 (configuração 250-100), pois a vazão de ar necessária foi determinada pela necessidade do processo de tratamento, enquanto nas configurações 250-200 o fator limitante foi a necessidade de manter as biopartículas em suspensão.

- A biomassa não aderida às biopartículas mostrou-se de difícil sedimentação, tornando atrativa a utilização de um sistema de flotação como separador de sólidos em suspensão do efluente final.

### BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA and WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Ed. 20, Washington, D.C., 1998.
- ASCE. Standard Measurement of oxygen transfer in clean water. ANSI/ASCE 2-90, 1990, 66p.
- FURTADO, A.A.L.; ALBUQUERQUE, R.T.; LEITE, S.G.F.; PEÇANHA, R.P. Effect of hydraulic retention time on nitrification in airlift biological reactor. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.15,n.3, 1998.
- HAGEDORN-OLSEN, C.; MØLLER, I.H.; TØTTRUP, H.; HARREMOES, P. Oxygen reduces denitrification in biofilm reactors. Water Science & Technology, v.29, n.10/11, p.83-91, 1994.
- HEIJNEN, J. et al. Large-scale anaerobic/aerobic treatment of complex industrial wastewater using immobilized biomass in fluidized bed and air-lift suspension reactors. Chemical Engineering Technology, v.13, p.202-208, 1990.
- IWAI, S.; KITAO, T. Wastewater treatment with microbial films. Lancaster USA: Technomic Publishing Company, 1994, 183 p.
- MENDONÇA, N. Tratamento de esgoto sanitário empregando reator de leito expandido em escala plena em zonas anaeróbia e aeróbia sobrepostas: Concepção, construção e operação. 2004. 201p. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- NICOLELLA, C.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M; HEIJNEN, J.J. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. Journal of Biotechnology, v.80, n.1, p. 1-33, 2000a.
- NICOLELLA, C.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M; HEIJNEN, S.J. Particle-based biofilm reactor technology. Trends in Biotechnology, v.18, n.7, p. 312-320, 2000b.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H.. Principles and procedures of statistics. New York, McGraw-Hill, 1960, 481 p.
- STRONACH, S.M.; RUDD, T.; LESTER, J.N. Anaerobic digestion processes in industrial waste water treatment. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1986, 184p.