

II-224 - ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DO LODO OBTIDO NO PROCESSO DE LODOS ATIVADOS AERAÇÃO PROLONGADA, EMPREGANDO COLUNAS DE SEDIMENTAÇÃO

Francielle da Silva Maria⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná, Mestranda em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – PPGERHA da Universidade Federal do Paraná.

Renata Correia⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná

Miguel Mansur Aisse⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná. Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Professor Associado da Universidade Federal do Paraná.

Endereço⁽¹⁾: PPGERHA da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS. Centro Politécnico- Jardim das Américas – Curitiba - Paraná – CEP: 81.531.990 – Brasil - Tel: +55 (41) 3361-3144 -e-mail: francielle_sm@yahoo.com.br

RESUMO

No sistema de lodos ativados, os decantadores secundários atuam na separação de sólidos em suspensão e no seu adensamento. Para determinar a eficiência de remoção e obter os parâmetros de dimensionamento, devem se considerar as velocidades de sedimentação presentes no sistema. Tal procedimento é efetuado através de testes em colunas de sedimentação, avaliando a evolução da interface lodo/esgoto (menisco) em diferentes intervalos de tempo. Sendo assim, os objetivos específicos desse estudo foram (1) obter curvas de sedimentabilidade de lodo aeróbio proveniente da ETE Belém – Sanepar (tipo aeração prolongada); (2) obter a equação da velocidade de sedimentação em função da concentração de lodo, avaliando os resultados obtidos; e (3) identificar o efeito parede durante a sedimentação do lodo ativado, dosado em provetas (colunas de sedimentação) de diferentes diâmetros. O método do trabalho foi baseado em testes de bancada com colunas de sedimentação com capacidade para 1L, 2L e 30L. Utilizou-se o lodo secundário (lodo de retorno), e através de uma adaptação ao método proposto por Aisse (1985), avaliaram-se várias condições de sedimentabilidade em concentrações de lodo de 2000 a 9000 mg/L. Cada teste empregava 4 provetas com a mesma concentração de lodo, em um tempo de observação entre 35 e 75 minutos cada, dependendo da diluição empregada. Simultaneamente aos testes foram analisados parâmetros de operação da ETE Belém, devido a sua influência nas características de sedimentação do lodo secundário. As curvas da “velocidade de sedimentação VS. Concentração” ($v = v_0 \cdot e^{-kc}$) foram determinadas por meio de ajustes estatísticos. Os resultados foram comparados com a literatura, avaliando-se a influência do diâmetro da coluna de sedimentação na velocidade de sedimentação (efeito parede).

PALAVRAS-CHAVE: Coluna de sedimentação, Decantador secundário, Efeito parede, Lodo ativado aeração prolongada, Velocidade de sedimentação.

INTRODUÇÃO

O sistema de lodos ativados é bastante utilizado, principalmente em situações que se deseja uma elevada qualidade do efluente, com baixos requisitos de área. No entanto, a complexidade operacional, o nível de mecanização e o consumo energético devem ser considerados na escolha desta tecnologia. Os itens integrantes a um sistema de fluxo contínuo são: decantador primário, tanque de aeração (reator biológico), decantador secundário, recirculação de lodo e retirada de lodo excedente.

O processo de sedimentação pode sofrer influências da concentração de sólidos da amostra, dimensão e densidade das partículas, viscosidade entre outros (MACHADO *et al.*, 2010). Dos quatro tipos de sedimentação descritos pela literatura, o que particularmente interessa ao lodo ativado é da separação retardada ou zonal (Figura 1). Os decantadores secundários atuam na separação de sólidos em suspensão e adensamento. Para obter parâmetros de dimensionamento destas unidades, devem ser consideradas as velocidades de sedimentação das partículas. Para tanto, ensaios em colunas de sedimentação que avaliam e mensuram a evolução da interface lodo/esgoto (menisco) em diferentes intervalos de tempo são utilizados.

A sedimentação zonal é caracterizada por um elevado teor de sólidos, os quais tendem a formar um manto que sedimenta como uma massa única de partículas. Observa-se uma nítida interface de separação entre a fase sólida e a fase líquida (clarificada), e o nível da interface se move para baixo como resultado da sedimentação da manta de lodo (METCALF e EDDY, 2003).

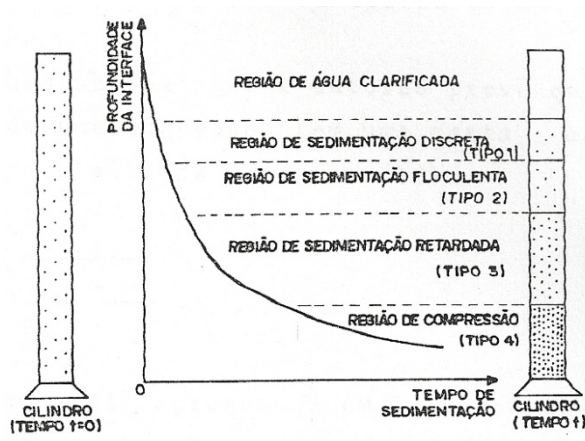


Figura 1- Sedimentação zonal ou impedida

Fonte: AISSE (1985)

Aisse (1985 e 1996) e Barbosa e Souza (1998) desenvolveram experimentos, em colunas para avaliação da velocidade de sedimentação zonal (VSZ) do lodo ativado, obtendo equações do tipo:

$$v = v_0 \cdot e^{-kc} \quad (1)$$

Onde:

v : velocidade de sedimentação da interface (m/h);

C : concentração de sólidos em suspensão (kg/m^3);

v_0 e k : coeficientes da equação, obtidos experimentalmente.

Von Sperling e Froes (1998) utilizaram a equação (1) para o dimensionamento de decantadores secundários.

As interferências das paredes do tubo das colunas, utilizadas nos experimentos, ocorrem algumas vezes alterando os resultados reais. Para tanto, recomenda-se utilizá-las com diâmetro superior a 150 mm (JORDÃO e PESSOA, 2011). Aisse (1985) afirma que podem ser inseridos agitadores lentos de forma a manter uniforme a concentração para o início do experimento. A Tabela 1 apresenta os diâmetros e altura das colunas utilizadas em muitos experimentos.

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a sedimentação do lodo obtido no processo de lodos ativados aeração prolongada. Como objetivos específicos: (i) obter as velocidades de sedimentação do lodo ativado dosado em diferentes concentrações, (ii) obter a equação da velocidade de sedimentação em função da concentração de lodo, avaliando os resultados obtidos; e (iii) identificar o efeito parede durante a sedimentação do lodo ativado, dosado em provetas com diferentes diâmetros.

Tabela 1 – Dimensões de Colunas de sedimentação citados na literatura técnica

AUTORES	LODO	ALTURA(m)	DIÂMETRO (cm)
LARSEN e VERSILIND*	AERÓBIO	0,9	5; 10; 15 e 20
DICK e EWING*	AERÓBIO	0,15 – 1,50	8,75
DICK e EWING*	AERÓBIO	1,05	1,55 – 18,75
DUNCAN e KAWATA*	AERÓBIO	0,65 – 1,30	16,9 – 16,3
DICK e YOUNG*	AERÓBIO	2,55	15,1
ECKENFELDER e FORD*	AERÓBIO	2,4	15
AISSE (1985)	AERÓBIO	2	15,6
BARBOSA e SOUZA (1998)	AERÓBIO	0,41	6,3
CARVALHO e DI BERNARDO (1998)	ETA	2,2	30
CAMPOS <i>et al.</i> (2009)	SÉPTICO	0,44	5,5

FONTE: *Citados por Aisse (1985)

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na ETE Belém- da Companhia de Saneamento do Paraná- SANEPAR (Curitiba – PR), que opera desde o início do ano de 1980, utilizando o processo de lodos ativados - aeração prolongada, em valo de oxidação “carroussel”, e atende a bacia hidrográfica do Rio Belém. Atualmente encontra-se operando com vazão um pouco acima da capacidade de projeto.

A avaliação da sedimentabilidade do lodo ativado em colunas de sedimentação foi subdividida em duas etapas. A primeira etapa foi realizada entre os meses de Dezembro a Fevereiro de 2012, sendo o lodo coletado nos tanques de aeração e diluído com efluente secundário. Para tanto, utilizou-se provetas de plástico transparente, graduadas milimetricamente, capacidade de 1L e 2L com 7,6 cm e 8,6 cm de diâmetro respectivamente (ver Figura 2).



Figura 2- Colunas de sedimentação utilizadas nos ensaios: (a) provetas de 1L e 2L (b) colunas de sedimentação 30L

Nas colunas procedeu-se da seguinte maneira: preenchimento das provetas com lodo secundário e efluente secundário; homogeneização das provetas simultânea e lentamente, repouso de 5 minutos e início da contagem do tempo. As leituras foram realizadas nos tempos 0; 1; 2; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 45; 60; 75 e 90 min. Em cada ensaio, a posição da interface anotada em relação ao tempo, permitiu a elaboração do gráfico de altura da

interface em relação ao tempo. Para a velocidade de sedimentação, selecionaram-se as alturas referentes ao primeiro trecho reto das curvas, conforme apresentado na Figura 3.

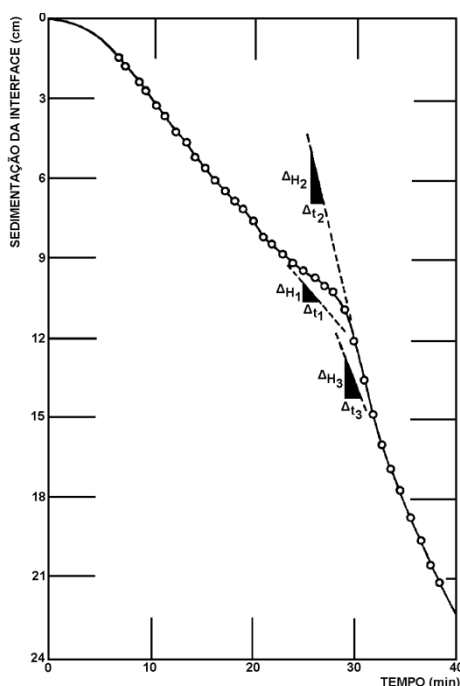


Figura 3- Curva de sedimentação do tipo 3

Fonte: AISSE (1985) citando LARSEN e VERSILIND (1968)

Para cada concentração ensaiada foram realizados ensaios em 4 provetas de cada volume, cada uma conduziu a um resultado de velocidade de sedimentação, sendo ao final feito a média dos valores obtidos. As proporções utilizadas nos ensaios encontram-se na TABELA 1.

Tabela 1- Proporções lodo e efluente secundário utilizados na ETAPA 1

Ensaio	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
Configurações ensaiadas	Provetas 1L Provetas 2L	Provetas 1L Provetas 2L	Provetas 1L Provetas 2L	Provetas 1L Provetas 2L	Provetas 1L Provetas 2L
Volume de água de reuso (efluente secundário)	0 0	300 ml 600 ml	500 ml 1000 ml	700 ml 1400 ml	800 ml 1600 ml
Volume de lodo secundário	1000 ml 2000 ml	700 ml 1400 ml	500 ml 1000 ml	300 ml 600 ml	200 ml 400 ml

A segunda etapa foi realizada nos meses de Junho e Julho de 2012, utilizando-se colunas de 2L e 30L com 8,6 cm e 20 cm de diâmetro respectivamente, sendo o lodo coletado afluente as centrífugas. Os procedimentos nas colunas foram semelhantes ao realizado na etapa 1. As proporções utilizadas nesta etapa encontram-se na TABELA 2.

Tabela 2- Proporções de lodo e efluente secundário utilizados na ETAPA 2

Ensaio	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Configurações ensaiadas	Provetas 30L Provetas 2L	Provetas 30L Provetas 2L	Provetas 30L Provetas 2L	Provetas 30L Provetas 2L
Volume de água de reuso (efluente secundário)	19300 ml 1285 ml	22000 ml 1465 ml	25200 ml 1680 ml	27000 ml 1800 ml
Volume de lodo secundário	10700 ml 715 ml	8000 ml 535 ml	4800 ml 320 ml	3000 ml 200 ml

A análise estatística para verificação da existência do efeito parede foi feita utilizando a distribuição t de Student para amostras pareadas mediante a utilização do programa Biostat 2.0. Assume-se que as amostras são dependentes e comparam-se as médias populacionais, sendo que, para cada unidade amostral, realizamos duas medições da característica de interesse. De modo, geral, essas observações correspondem a medidas tomadas antes e depois de uma dada intervenção. Sendo assim, temos uma situação típica em que o teste t pareado deve ser utilizado.

As medidas de velocidades de sedimentação nas colunas de 1L e 2L serão representadas pelas variáveis aleatórias X_i e Y_i , respectivamente. Desta forma, o efeito produzido pode ser representado pelo i – **ésimo** indivíduo, pela variável $D_i = Y_i - X_i$. Supondo para $i = 1, \dots, n$,

$$D_i \sim N(\mu_D, \sigma_D^2)$$

Buscando testar as hipóteses:

$$H_0: \mu_D = 0 \text{ (as velocidades de sedimentação são iguais)}$$

$$H_a: \mu_D \neq 0 \text{ (as velocidades de sedimentação são diferentes)},$$

O parâmetro μ_D é estimado pela média amostral \bar{D} . O estimador S_D^2 é dado por:

$$S_D^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2$$

O teste de hipóteses é realizado utilizando-se a quantidade:

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{S_D / \sqrt{n}}$$

Que sob H_0 , segue uma distribuição t-Student com $n-1$ graus de liberdade (MAGALHÃES e LIMA, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CURVAS DE SEDIMENTABILIDADE

As Figuras 4 e 5 ilustram as curvas altura de sedimentação x tempo, obtidas para a concentração de sólidos de 2.000 mg/l, nas duas etapas da pesquisa. O mesmo procedimento foi desenvolvido para concentrações de 4.000 a 9.000 mg/l (Correia, 2012). Os resultados, em geral, mostram que quanto menor a concentração de sólidos, maior foi a facilidade de se encontrar o trecho reto de maior inclinação na curva de sedimentação, para a determinação da velocidade. Ou seja, a concentração de sólidos é inversamente proporcional à velocidade de sedimentação.

VELOCIDADES DE SEDIMENTAÇÃO

Após a obtenção das curvas altura de sedimentação x tempo e das velocidades de sedimentação, para cada concentração e cada diâmetro de coluna (Tabelas 3 e 5), foi possível elaborar a curva velocidade de sedimentação em relação à concentração. Esta foi determinada pelo método dos mínimos quadrados, tanto para a primeira etapa (Figura 6) quanto para a segunda etapa (Figura 7).

Para os valores obtidos na primeira etapa, utilizando-se colunas de 1L e 2L, a equação obtida para a proveta de 2.000 mL conduz a valores de R^2 maiores (Tabela 4), supondo um melhor ajuste. Para dados da segunda etapa, o melhor ajuste foi para a coluna de 30.000 mL (Tabela 6).

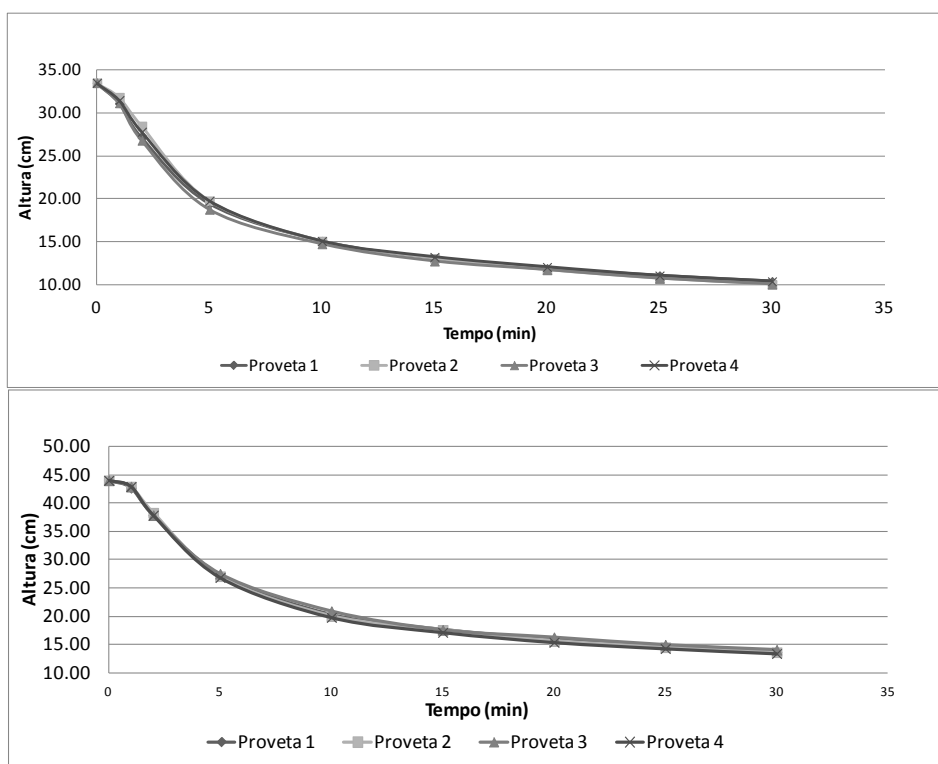


Figura 4-Gráfico Altura de sedimentação x tempo-2.040 mg/L -ETAPA 1 (a) 1.000 mL (b) 2.000 mL

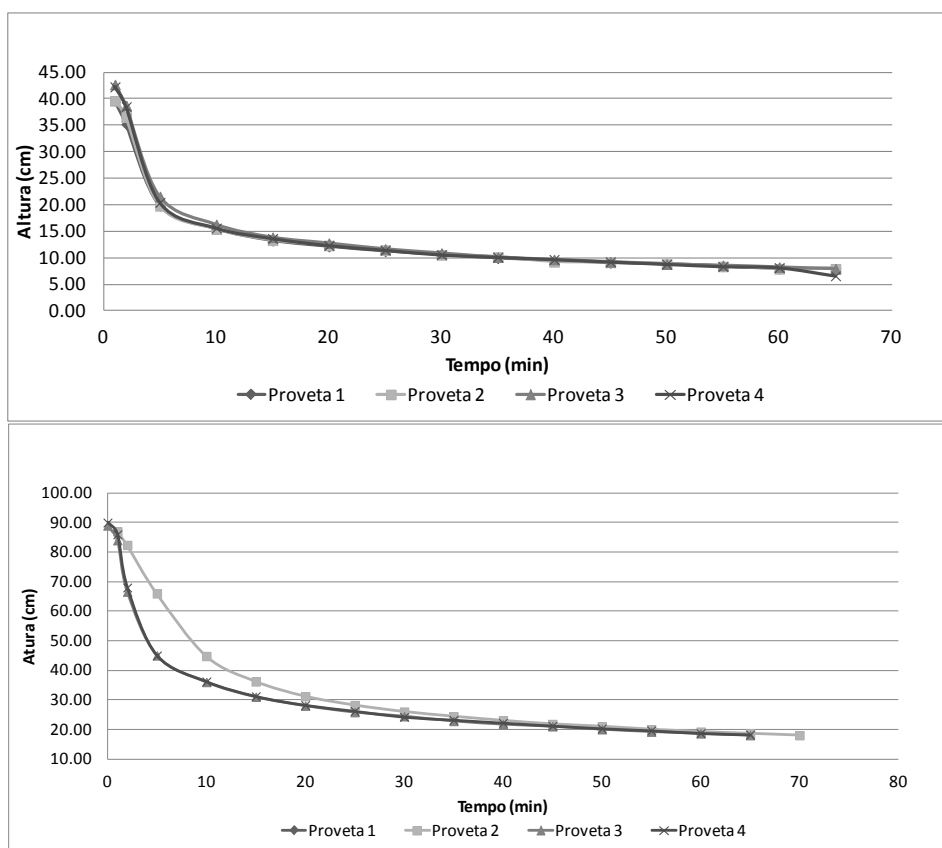


Figura 5- Gráfico Altura de sedimentação x tempo-2.000 mg/L -ETAPA 2 (a) 2.000 mL (b) 30.000 mL

Tabela 3- Velocidades de sedimentação em colunas de 1L e 2L

Concentração do lodo (mg/L)	1.000 mL		2.000 mL	
	Média das velocidades (m/h)	Taxa de aplicação superficial (m³/m².dia)	Média das velocidades (m/h)	Taxa de aplicação superficial (m³/m².dia)
2680	1,688	40,522	2,351	56,430
4020	0,221	5,293	0,551	13,235
6700	0,055	1,321	0,076	1,815
8960	0,038	0,918	0,038	0,923

Com os dados expressos na Tabela 3, observa-se que as taxas de aplicação superficial, obtidas em colunas de concentração do lodo de 2.000 mL, foram maiores em todos os ensaios, com exceção da maior concentração.

Barbosa e Souza (1998) analisaram a sedimentação de lodo secundário, obtido do sistema Bardenpho, localizado na ETE Brasília Norte. Utilizando provetas de 1L e 6,3 cm de diâmetro, obtiveram para as concentrações de 2.589 mg/L; 3964mg/L e 6094 mg/L , velocidades de sedimentação de 0,64 m/h, 0,048 m/h e 0,03m/h respectivamente. Existe uma diferença considerável quando comparadas aos resultados obtidos pelo trabalho na ETE Belém, para concentrações próximas. Este fato pode ser atribuído as diferenças conceituais entre os dois processos de tratamento.

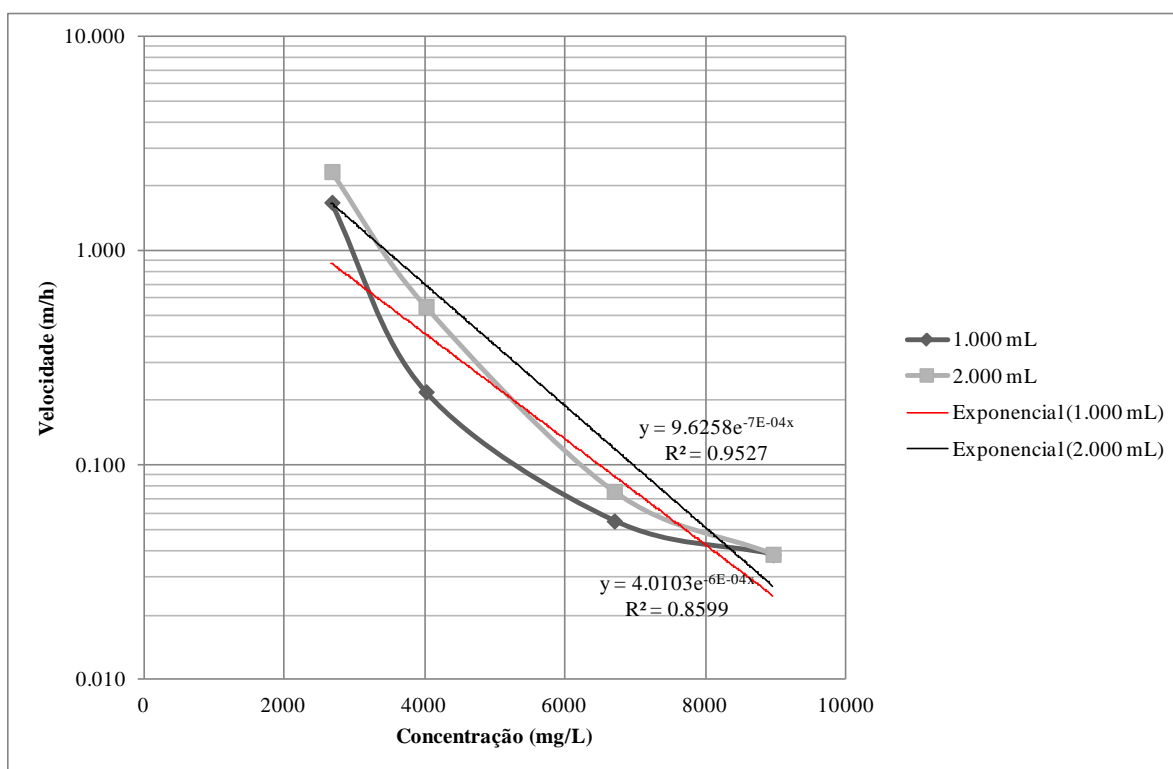


Figura 6-Velocidade de sedimentação em relação a concentração – ETAPA 1

Tabela 4- Equação das velocidades de sedimentação para provetas de 1L e 2L

Volume (mL)	Equação	R²
1.000	$v = 4,0103e^{-6E-04x}$	0,8599
2.000	$v = 9,625e^{-7E-04x}$	0,9527

Tabela 5- Velocidades de sedimentação para colunas de 2L e 30L

Concentração do lodo (mg/L)	2.000 mL		30.000 mL	
	Média das velocidades (m/h)	Taxa de aplicação superficial (m³/m².dia)	Média das velocidades (m/h)	Taxa de aplicação superficial (m³/m².dia)
2500	1,690	40,5680	2,847	68,320
4000	1,099	26,3670	1,265	30,367
6000	0,096	2,3021	0,119	2,866
8000	0,030	0,7128	0,026	0,612

Na segunda etapa as velocidades de sedimentação na coluna de 30.000 mL estiveram acima das encontradas na coluna de 2.000 mL, nas concentrações 2.500 mg/L a 6.000 mg/L.

Aisse (1985) trabalhando com lodo secundário, diluído com efluente, em colunas de sedimentação de 2,0 m de altura e 15,6 cm de diâmetro, obteve para 2.690 mg/L, 4048 mg/L, 6079 mg/L e 8986 mg/L as velocidades de sedimentação respectivamente de 1,36 m/h, 0,72 m/h, 0,50 m/h e 0,02 m/h. Estes valores foram obtidos em uma coleção de dados, obtidos em 5 campanhas realizadas ao longo de 1 ano, na mesma ETE. Selecionaram-se dados que tivessem concentrações próximas as utilizadas no trabalho mais atual. Assim, as velocidades obtidas por Aisse(1985) foram inferiores, para 2.500 e 4.000 mg/l, quando comparadas com a proveta de 30 L. Para a concentração de 6.000 mg/l o valor foi superior. Este fato pode ser atribuído as diferenças operacionais na ETE, entre as datas das pesquisas.

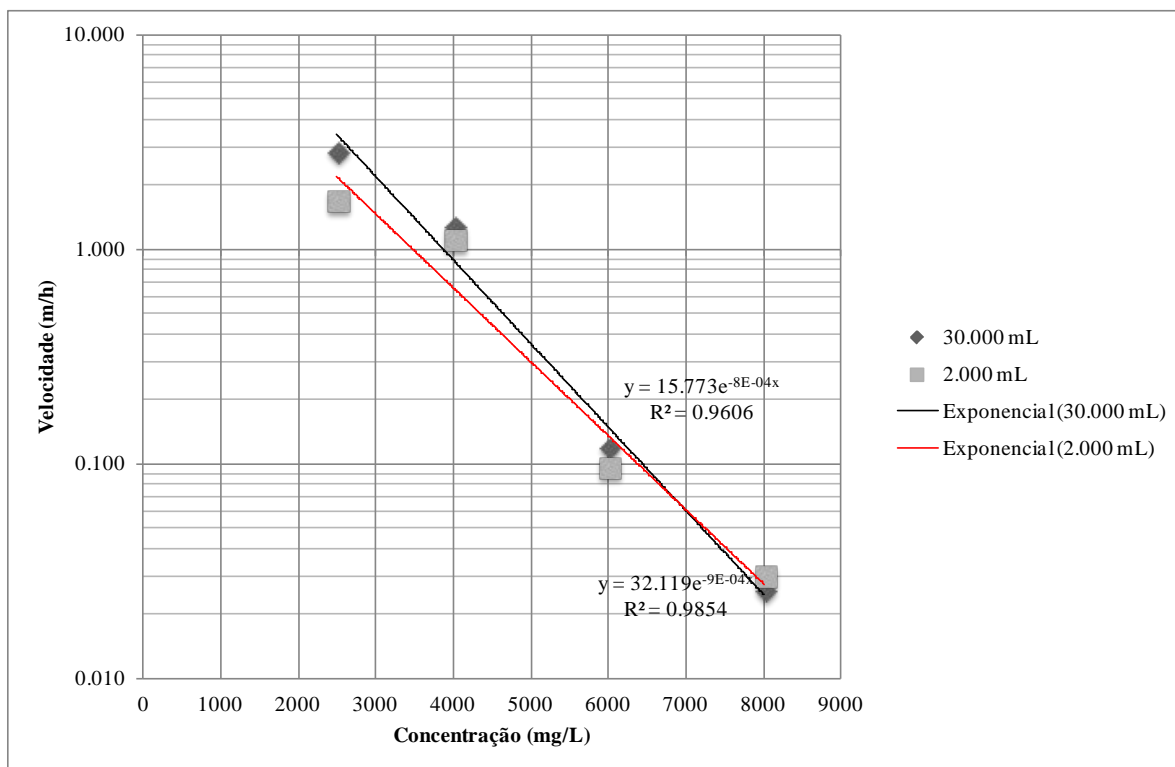


Figura 7- Velocidade de sedimentação em relação a concentração – ETAPA 2

Tabela 6- Equação das velocidades de sedimentação para colunas de 2L e 30L

Volume (mL)	Equação	R²
2.000	$v = 15,773e^{-8E-04x}$	0,9606
30.000	$v = 32,119e^{-9E-04x}$	0,9854

EFEITO PAREDE

A análise estatística dos dados utilizando o Test t de Student para amostras pareadas, demonstrou para os dados da primeira etapa e IC de 95%, para as concentrações de 6.700mg/L e 8900 mg/L, que a média das velocidades de sedimentação podem ser consideradas iguais (Tabela 7).

Tabela 7- Análise estatística dos dados da ETAPA- 1

Concentração (mg/L)	Média das Diferenças	Desvio da diferença	t _{obs}	tc 95%	Hipótese Verdadeira
2680	0,6629	0,101	13,188	3,18	Ha
4020	0,3309	0,176	3,763	3,18	Ha
6700	0,0206	0,027	1,521	3,18	H0
8960	0,0002	0,015	0,027	3,18	H0

Na segunda etapa, que utilizou colunas de 2L e 30L, a média das velocidades de sedimentação podem ser consideradas iguais em todos os casos, exceto para a concentração de 2.500 mg/L (Tabela 8). Ou seja, quanto maior o teor de sólidos totais na amostra, menor a diferença encontrada entre as médias das velocidades.

Tabela 8- Análise estatística dos dados da ETAPA- 2

Concentração (mg/L)	Média das Diferenças	Desvio da diferença	t _{obs}	tc 95%	Hipótese Verdadeira
2500	1,1563	0,0890	25,981	3,18	Ha
4000	0,1667	0,1410	2,365	3,18	H0
6000	0,0235	0,0623	0,754	3,18	H0
8000	-0,0042	0,0063	-1,340	3,18	H0

Para este caso, existem poucos indicativos de efeito parede utilizando-se colunas de diferentes diâmetros. No entanto, uma amostra populacional maior e a utilização de colunas de diâmetros, entre 8,9 cm e 20 cm, verificariam a partir de qual dimensão o efeito parede é inexistente em todas as concentrações ensaiadas, e conduziria a resultados mais precisos, podendo ser utilizados outros testes estatísticos.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral estudar a sedimentação do lodo obtido no processo de lodos ativados aeração prolongada. Dos trabalhos experimentais conduzidos na ETE Belém, da Sanepar, obteve-se que as velocidades de sedimentação zonais (tipo 3) são menores, quanto mais elevadas as concentrações de sólidos totais na amostra. Na maior parte dos casos, as velocidades de sedimentação obtidas em colunas de maiores diâmetros conduzem a valores maiores. Estatisticamente, não existe diferença entre as velocidades de sedimentação encontradas em colunas de diferentes diâmetros, considerando a amostra de dados utilizada (1L Vs 2L e 2 L vs 30L). Os resultados apontaram que, quanto maior o teor de sólidos da amostra, menor a diferença entre as médias das velocidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AISSE, M. M. **Sedimentação do Lodo Secundário obtido no Processo dos Lodos Ativados**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, 1985. 205p.
2. AISSE, M. M. Projeto, Construção e Operação de Coluna de Sedimentação para avaliação do Lodo ativado. In: **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. Jul/Set: 88-95. 1996.
3. BARBOSA, C. A. C. ; SOUZA, M. A. A. **Sedimentabilidade do Lodo Secundário obtido no Processo de lodos ativados com remoção biológica de nutrientes**. Brasília, UNB. 1998. 21p.
4. CAMPOS, J.R *et al.* Tratamento Combinado de Lodo de Tanque Séptico e de Fossas Sépticas com Esgoto Sanitário. In: **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro, ABES, 2009. 181-282p.

5. JORDÃO, E. P. e PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro, ABES. 2011.
6. CARVALHO e DI BERNARDO, L. Interferência de despejo das Estações de Tratamento de Água na digestão de lodo de esgotos. XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental . Lima – Perú. **Anais**. 1998. 16p.
7. CORREIA, R. **Estudo da sedimentação de lodo de ETEs e ETAs**. Relatório de Iniciação Científica. Curitiba, UFPR. 2012. 20p.
8. MACHADO , L. M. O. *et al.* Avaliação da Eficiência de Remoção de Sólidos do Ensaio de Coluna de Sedimentação para Efluentes Sanitários. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 26, Porto Alegre. **Anais**. Rio de Janeiro, ABES. 2010.
9. MAGALHÃES, M. N. ; LIMA, A. C.P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. São Paulo, EDUSP. 2013. 408p.
10. METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering, treatment and reuse**. 4ª Edição, McGraw-Hill, New York, USA, 2003.
11. VON SPERLING, M.; FROES, C. M. V. Dimensionamento e controle de Decantadores Secundários com base em uma abordagem integrada e simplificada da Teoria do Fluxo de Sólidos. In: **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. 3(1/2):42-54. 1998.