

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/301802570>

# II-219 -FORMAÇÃO DE LODO GRANULAR AERÓBIO EM UM REATOR EM BATELADAS SEQUENCIAIS TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO

Conference Paper · October 2015

---

CITATIONS

0

---

READS

8

6 authors, including:



[Eduardo Lucas Subtil](#)

Universidade Federal do ABC (UFABC)

**14** PUBLICATIONS **20** CITATIONS

SEE PROFILE

**II-219 - FORMAÇÃO DE LODO GRANULAR AERÓBIO EM UM REATOR EM BATELADAS SEQUENCIAIS TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO.****Amanda Rodrigues Inácio<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário Senac. Mestranda em Engenharia Civil – Área: Saneamento e Ambiente pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professora de ensino profissional no curso Técnico em Meio Ambiente e coordenadora do Sistema Senac de Gestão Ambiental do Senac Campinas.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Sacramento,490 – Centro - Campinas - SP - CEP: 13010-210- Brasil - Tel: (19) 2117-0000 - e-mail: [amanda.rinacia@sp.senac.br](mailto:amanda.rinacia@sp.senac.br)

**Júlio César Costa**

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário do SENAC.

**Maria Eliana Santos Cantil**

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário Senac.

**Rodrigo de Freitas Bueno**

Biólogo e Engenheiro Ambiental, Mestre em Saúde Pública – Área: Saúde Ambiental pela Faculdade de Saúde Pública da USP, Doutorando em Engenharia Civil – Área: Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da USP.

**Eduardo Lucas Subtil**

Oceanógrafo, Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo, Doutor em Engenharia Civil – Área: Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da USP. Professor Adjunto em Saneamento Ambiental do Curso de Engenharia Ambiental e Urbana e da pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do ABC (UFABC)

**RESUMO**

O processo de granulação aeróbia em reatores em bateladas sequenciais é uma otimização do sistema de lodo ativado convencional, possuindo biomassa ativa com características próprias, das quais se destacam flocos de maior diâmetro, densidade e velocidade de sedimentação. Nestes sistemas, os flocos aeróbios se desenvolvem na forma de grânulos, atingindo diâmetros médios de 8mm, com matriz regular, lisa e forma arredondada. Por ser um sistema inovador, grande parte dos estudos relatados são focados em aplicações deste sistema para tratamento de esgoto industrial e sintético. Sendo assim, determinou-se uma Investigação Experimental, através de um sistema piloto experimental, para a avaliação da formação do lodo granular aeróbio em um reator em bateladas sequenciais tratando esgoto sanitário. O sistema foi operado por 117 dias e os flocos atingiram valor máximo de diâmetro de 4,2mm, bem como a velocidade de sedimentação aumentou chegando a 6m/h, porém não puderam ser caracterizados como grânulos aeróbios, encontrando-se entre a terceira e a quarta etapa do processo de granulação aeróbia.

**PALAVRAS-CHAVE:** reator em bateladas sequenciais, tratamento de esgoto sanitário, lodo granular aeróbio.

**INTRODUÇÃO**

O conjunto de atividades que compõem o Saneamento Básico está diretamente ligado à promoção de saúde pública de maneira preventiva. No Brasil, o processo de esgotamento sanitário ainda encontra-se com déficit de acesso por parte da população. A necessidade de disseminação deste serviço somado às novas legislações, que estão cada vez mais restritivas quanto às concentrações de lançamento de material orgânico e nutrientes, e a redução de área disponível para implantação de sistemas de tratamento de esgoto faz com que seja necessário o desenvolvimento de novos sistemas e tecnologias neste setor.

Dentro deste contexto, surge então o sistema de lodo granular aeróbio, que pode ser entendido como uma otimização do sistema de lodos ativados, amplamente conhecido e aplicado no Brasil e no mundo. O primeiro

relato de desenvolvimento de grânulos aeróbios foi de Mishima e Nakamura em 1991, em um sistema contínuo em um reator aeróbio de manta de lodo com fluxo ascendente (MORAIS, 2011). Para se obter o processo de granulação aeróbia é necessário que a operação seja feita em um reator em bateladas sequenciais, onde ocorrem todos os processos e operações normalmente associados ao tratamento de lodos ativados, porém em um único tanque (TAY; LIU; LIU, 2001).

Os grânulos aeróbios são diferentes dos flocos aeróbios de lodos ativados, uma vez que possuem características como estrutura física regular, forte e densa, excelente capacidade de sedimentação, elevada retenção de biomassa e capacidade de tratar esgotos com alta concentração e suportar cargas de choque. Deste modo, para que os microrganismos se agreguem e formem grânulos é necessário que haja um ambiente favorável (LIU & TAY, 2004), e há diversos fatores que influenciam no processo de formação de grânulos aeróbios, entre eles a carga orgânica.

Esgotos sanitários possuem carga orgânica variada, e esta variação pode afetar a estabilidade do sistema (TAY et al. 2004). Além da carga orgânica, outros fatores influenciam na formação dos grânulos, como alimentação do reator, força de cisalhamento hidrodinâmico, tempo de sedimentação e temperatura (DE KREUK; PRONK; VAN LOOSDRECHT, 2005; NI & YU, 2008; LEIRO, 2011; TAY; LIU; LIU, 2001; WAGNER, 2011; WAGNER et al., 2011; ZHU et al., 2012).

É possível formar lodo granular aeróbio operando um reator em bateladas sequenciais tratando esgoto sanitário, com diferentes ciclos operacionais e sob baixos tempo de sedimentação. Porém, estudos com aplicação deste sistema no tratamento de esgotos sanitários ainda são escassos, necessitando maior enfoque da comunidade científica nessa aplicação, uma vez que tal sistema pode proporcionar benefícios como facilidade operacional, baixo custo, menor demanda de área para implantação, menor demanda de energia, além da possibilidade de remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo (DE KREUK, 2006).

Sendo assim, determinou-se neste estudo uma investigação experimental para avaliar as condições necessárias para formação do lodo granular aeróbio em um reator em bateladas sequenciais tratando esgoto sanitário. O sistema piloto experimental foi operado e monitorado por 117 dias, visando a caracterização morfológica e evolução dos flocos aeróbios.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Um reator em bateladas sequenciais foi operado tratando esgoto sanitário por 117 dias. Durante este período, a operação do sistema piloto experimental foi dividida entre Fase de Aclimação e Investigação Experimental, com configurações de ciclos de operação diferenciadas. Nesta seção serão apresentadas as características do esgoto sanitário bruto utilizado para alimentação do sistema, o sistema piloto experimental montado para este estudo, os ciclos determinados para a Fase de Aclimação e para a Investigação Experimental e a caracterização morfológica dos grânulos aeróbios utilizando-se o software Image J.

## CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO SANITÁRIO

O esgoto que alimenta o sistema piloto experimental vem do conjunto residencial (CRUSP) e do restaurante central da Universidade de São Paulo – USP. Porém, antes de alimentar o sistema, o esgoto era bombeado para o tratamento preliminar, composto por grade mecanizada (step-screen) e caixa de areia. Após a caixa de areia, o esgoto passava pela Calha Parshal, e era bombeado para o decantador primário do sistema piloto experimental. Na Tabela 1 têm-se a caracterização do esgoto sanitário bruto por meio de análises físico-químicas, descritas no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21th Edition (APHA, 2005).

**Tabela 1. Caracterização do Esgoto Sanitário Bruto.**

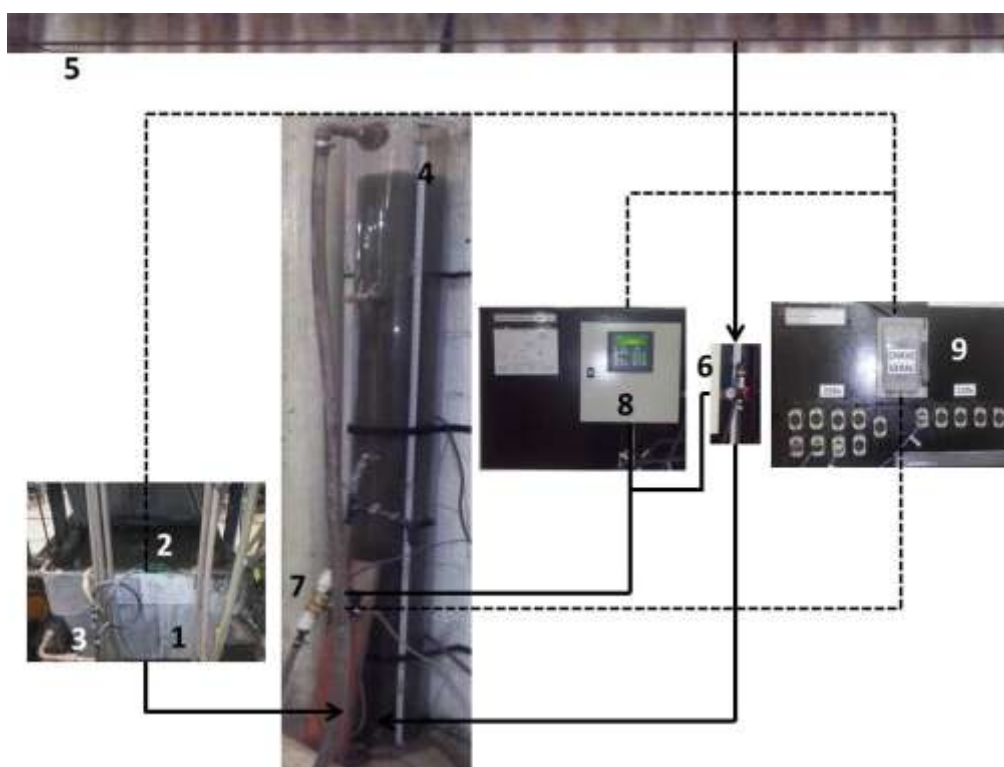
Variáveis	Unidade	Média	Desvio Padrão
pH	-	7	0,3
DQO total	mg/L	476	173
DQO solúvel	mg/L	183	82
SST	mg/L	183	163,7
SSV	mg/L	162	129,1
N-NTK	mgN/L	68	9,8

N-NH <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mgN/L	53	9,6
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mgN/L	<0,5	-
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mgN/L	<0,5	-
P-PO <sub>4</sub> solúvel total	mgP/L	4	1,1
P-PO <sub>4</sub> solúvel	mgP/L	5	0,9
Alcalinidade	mgCaCO <sub>3</sub> /L	219	45,7

### SISTEMA PILOTO EXPERIMENTAL

O sistema piloto experimental foi instalado no Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos – CTH – da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). O sistema piloto experimental foi composto por um reator do tipo coluna de bolhas, feito em acrílico, com as seguintes dimensões: 2,0m de altura e 0,17m de diâmetro, com volume total de 46 litros e útil de 44 litros. A automação do sistema foi realizada por meio de um controlador lógico programável (CLP).

A Figura 1 representa, de forma esquemática, o sistema piloto experimental com os seguintes componentes: 1 – Decantador primário; 2 – Bomba de alimentação submersa; 3 – Válvula de retenção; 4 – Reator; 5 – Tubulação de fornecimento de ar; 6 – Medidor de pressão com filtro coalescente acoplado; 7 – Válvula Solenóide para descarte; 8 – Painel geral de controle dos ciclos; 9 – Painel elétrico.



**Figura 1: Sistema Experimental.**

A alimentação do sistema piloto foi por meio de uma bomba submersa Sarlobetter (SB 1000A) instalada no decantador primário. O fluxo de alimentação do sistema foi ascendente. Para o controle da aeração no sistema foi instalado no reator uma válvula solenóide com filtro específica para ar a qual era controlada (on/off) pelo CLP. O sistema de aeração foi por ar difuso de bolhas finas e o fornecimento de ar por meio de um compressor. Para o descarte do esgoto tratado no final de cada ciclo foi instalada uma válvula solenóide a qual era controlada pelo CLP.

### FASE DE ACLIMATAÇÃO

Na partida do sistema, o reator foi preenchido com lodo ativado proveniente de um sistema de lodo ativado com aeração prolongada convencional tratando esgoto sanitário, instalado no Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade de São Paulo. A concentração de sólidos totais inicial foi de 3,0g.L<sup>-1</sup> e o volume de lodo adicionado no reator foi de 50% do volume útil do mesmo. O ciclo para

aclimação e formação inicial do LGA foi descrito na Tabela 2. Para adaptar o sistema piloto experimental, o tempo de sedimentação foi diminuído, gradualmente, de 40 minutos para 30 e 25 minutos, respectivamente, nas Etapas 1, 2 e 3. Após o término da Fase de Aclimação se deu início à Investigação Experimental.

**Tabela 21: Aclimação do Sistema Experimental Piloto**

	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>	<b>Etapa 3</b>
Ciclo (min)	180	180	180
Enchimento (min)	15	15	15
Reação (min)	122	132	137
Sedimentação (min)	40	30	25
Descarte (min)	3	3	3

## CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

O reator foi operado em temperatura ambiente e o pH do lodo controlado na faixa de 6,5 a 7,5. A concentração de OD foi mantida na faixa de 1,5 a 2,5 mg/L. A vazão de alimentação do sistema foi de 0,176 m<sup>3</sup>/dia. Conforme revisão da literatura, o ciclo operacional considerado ideal para formação do LGA nas condições deste estudo foi de 3 horas e com diminuição dos tempos de sedimentação. Para avaliação e formação do LGA neste estudo adotou-se como estratégia a diminuição do tempo de sedimentação gradualmente de 20, 19, 17 e 15 minutos para cada etapa da investigação experimental como mostra a Tabela 3.

**Tabela 32: Ciclos Operacionais para formação do lodo granular aeróbio.**

	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>	<b>Etapa 3</b>	<b>Etapa 4</b>
Ciclo (min)	180	180	180	180
Enchimento (min)	15	15	15	15
Reação (min)	142	143	145	147
Sedimentação	20	19	17	15
Descarte (min)	3	3	3	3

## ENSAIOS LABORATORIAIS

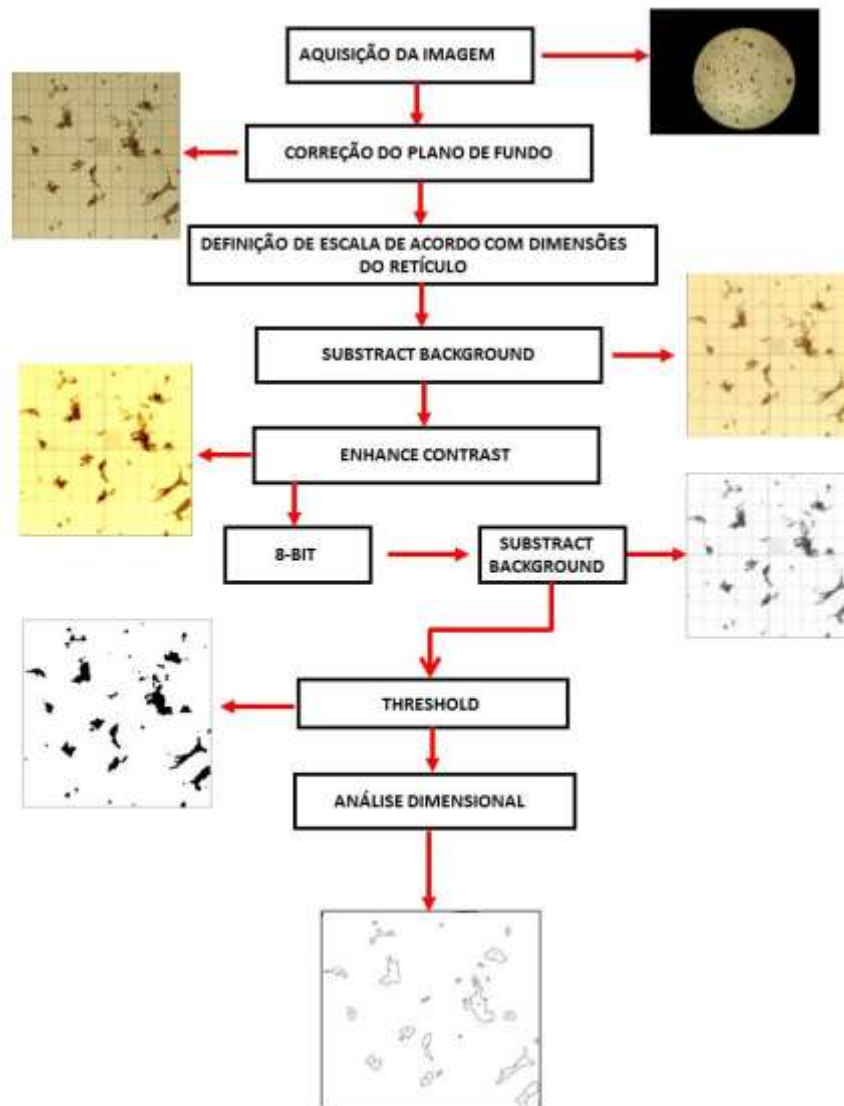
Os métodos analíticos utilizados foram descritos no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21th Edition (APHA, 2005). As determinações laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Saneamento Prof. Lucas Nogueira Garcez na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Para caracterização do LGA realizou-se a análise morfológica, a fim de se dimensionar os diâmetros dos flocos, bem como a velocidade de sedimentação, pois sistemas operados com LGA apresentam grandes diâmetros e altos índices de velocidade de sedimentação. O índice volumétrico de lodo também foi analisado, pois entende-se que quanto maior a velocidade de sedimentação, menor será o IVL, por isso, sistemas operados com LGA apresentam baixos índices nesse quesito.

### DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO LODO GRANULAR AERÓBIO

A determinação das características morfológicas do LGA foi baseada nas metodologias propostas por Perez, Leite e Coelho (2006) e por Bueno et al. (2013), que consistem em procedimentos de análise de imagem para caracterização de flocos de lodos ativados. No presente estudo, como sistema de análise de imagens foi utilizado o software livre Image J. Neste estudo, enfoca-se a obtenção dos diâmetros dos flocos denominado pelo software de Feret. Considera-se para Feret, a maior distância entre dois pontos ao longo da fronteira de seleção, também conhecida como calibre máximo.

Para obter o dimensionamento dos grânulos aeróbios, a amostra coletada foi diluída em água destilada com fatores que variariam entre 1:70 e 1:10, de acordo com a concentração de sólidos do sistema, uma vez que para realizar a análise de imagem não pode haver sobreposição dos flocos. Após a diluição, 1mL da amostra foi pipetada na Câmara de Sedgwick Rafter, que foi colocada no microscópio para que houvesse a captura da imagem. Posteriormente à captura, foi necessário que a imagem passasse por uma sequência de processos, visando que o programa não interferisse na estrutura do floco e que fosse possível dimensioná-lo de forma mais precisa. Tal sequência de processos pode ser observada na Figura 2.



**Figura 2: Representação esquemática do procedimento de análise de imagem.**

Para aprimorar a caracterização morfológica, determinou-se também uma metodologia para projeção em 3D da superfície dos flocos, a fim de se analisar a estrutura dos mesmos. Para tal utilizou-se, também, o software Image J. De acordo com Campos e Prado (2009), toda imagem digital é formada por um número finito de pixels, que são elementos primários, onde de acordo com a sua profundidade, pode assumir grande quantidade de intensidades que variam em números de tons por pixel. Assume-se que em uma imagem capturada, quanto mais intenso for o pixel, mais próximo à superfície este estará e, conseqüentemente, quanto menos intenso o for pixel, mais longe ele estará da superfície.

Como pode ser visto na Figura 3, capturando-se uma imagem e selecionando a ferramenta Interactive 3D Surface Plot é possível, então, projetar a superfície dos grânulos aeróbios, uma vez que a mesma distingue a intensidade dos pixels para tal projeção, que pode ainda ser feita com as cores originais da imagem ou em tons de cinza.

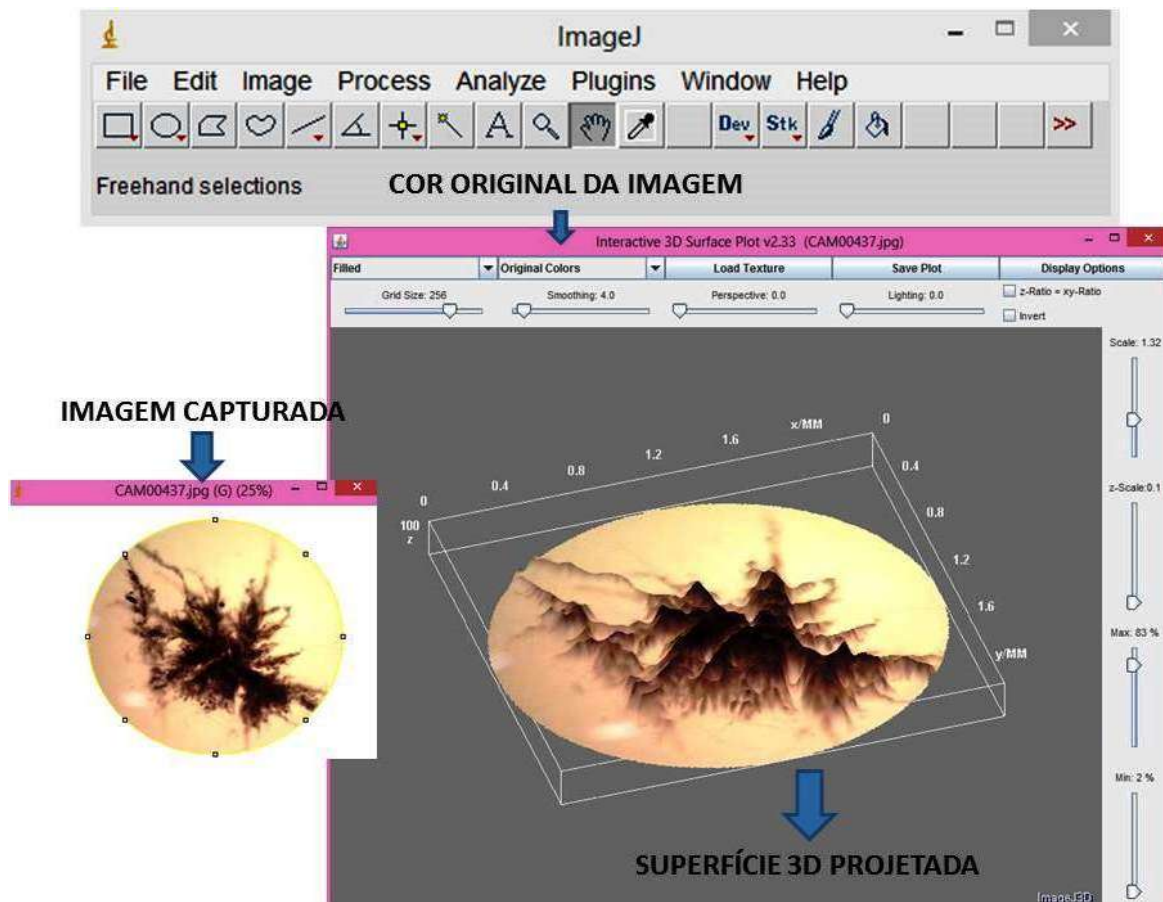


Figura 3: Interactive 3D Surface Plot - Image J.

## TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

O tratamento estatístico dos dados obtidos através do monitoramento do sistema piloto experimental se deu por meio de instrumentos de estatística básica como média, desvio padrão (DP), amplitude total (AT) e coeficiente de variação (CV).

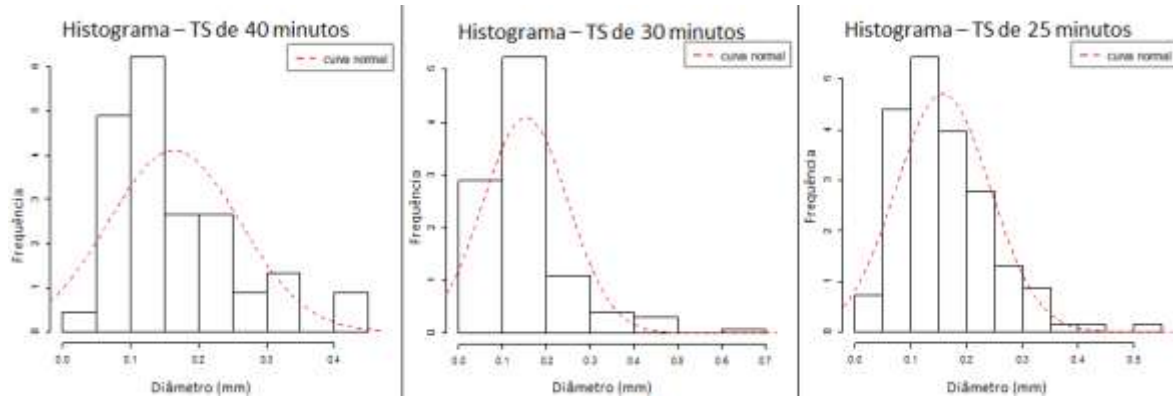
## RESULTADOS DA FASE DE ACLIMATAÇÃO

A Fase de Aclimação do sistema piloto experimental foi realizada a fim de se adaptar o sistema quanto às condições e estratégias de operação para formação do LGA. Como esperado, na Fase de Aclimação não houve alteração significativa em relação ao tamanho dos flocos, mesmo com a diminuição dos tempos de sedimentação de 40, 30 e 25 minutos, onde se obteve diâmetros médios de  $0,14 \pm 0,1$ mm,  $0,13 \pm 0,1$ mm e  $0,15 \pm 0,09$ mm respectivamente, como mostra a Tabela 4.

Tabela 43: Diâmetros dos grânulos aeróbios durante a Fase de Aclimação.

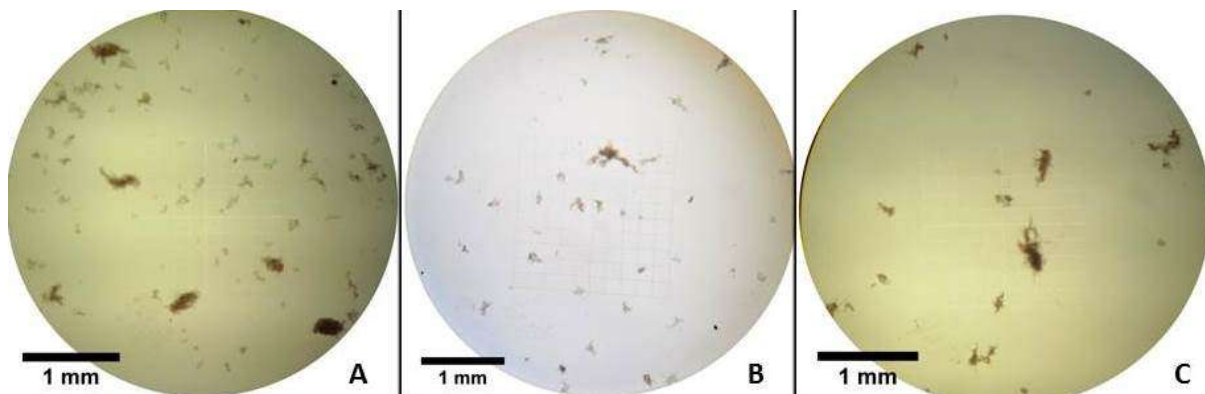
Fase de Aclimação			
Dias de Operação	2	8	12
$T_s$ (min)	40	30	25
MÉDIA (diâmetro em mm)	0,14	0,13	0,15
MÁXIMO (diâmetro em mm)	0,44	0,63	0,53
MÍNIMO (diâmetro em mm)	0,03	0,01	0,02
DESVIO PADRÃO	0,1	0,1	0,09
CV (%)	69,94	77,12	58,20
AT	0,41	0,62	0,51
n	45	128	136

Durante a Fase de Aclimação, notou-se que não houve alteração morfológica visual nos flocos aeróbios, reforçando a afirmação feita anteriormente. Isto pode ser comprovado na Figura 4, onde há os histogramas com a curva de distribuição do diâmetro dos flocos aeróbios, onde verifica-se que nas três etapas da Fase de Aclimação, os flocos se concentravam entre diâmetros de 0,1 e 0,2mm.



**Figura 41: Histogramas - Distribuição dos diâmetros dos flocos na Fase de Aclimação.**

No entanto, apesar do não aumento do flocos, foi possível manter uma concentração de biomassa no sistema sem perdas significativas de sólidos no efluente, o que possibilitou o início da fase de Investigação Experimental. A Figura 5 mostra a imagem de flocos de lodo ativado durante a Fase de Aclimação.



**Figura 5: Grânulos aeróbios durante a Fase de Aclimação. A) Tempo de Sedimentação de 40 minutos; B) Tempo de sedimentação de 30 minutos; C) Tempo de sedimentação de 25 minutos.**

## RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

Após a Fase de Aclimação, foi dado início a avaliação da formação do LGA por meio da caracterização morfológica. A Tabela 5 mostra os resultados experimentais obtidos durante a Investigação Experimental com diferentes tempos de sedimentação (Ts). Nos primeiros 7 dias de investigação e aos 19 dias de operação, com Ts = 20 minutos, o diâmetro médio dos flocos foi de  $0,16 \pm 0,2$  mm, apresentando-se ainda como lodo floculento. Visando a formação do LGA, o Ts foi diminuído para 15 minutos e mantido nessa condição por 21 dias. No entanto, essa nova condição resultou na perda excessiva de lodo floculento e lodo com boas características de sedimentação, permanecendo nas mesmas condições do Ts de 20 minutos, com diâmetro médio de  $0,17 \pm 0,1$  mm, o que pode ser observado na Figura 6. Devido à perda de biomassa no sistema, o Ts foi alterado para 20 minutos e adicionado um novo inóculo de lodo ativado. Nessa nova partida, o sistema já adaptado teve uma rápida recuperação, apresentando com 50 dias de operação um lodo em fase de granulação com diâmetro médio em torno de  $0,84 \pm 0,94$  mm, com valores máximos de 3,8 mm, valor típico de LGA.

Com base nos resultados, o Ts foi diminuído para 19 minutos, dando-se continuidade à Investigação Experimental para a formação do LGA. Aos 65 dias de operação, os flocos apresentavam diâmetro médio de  $3,39 \pm 0,68$  mm, alcançando diâmetro máximo de 4,10 mm. Com isto, Ts foi diminuído para 17 minutos. Tal

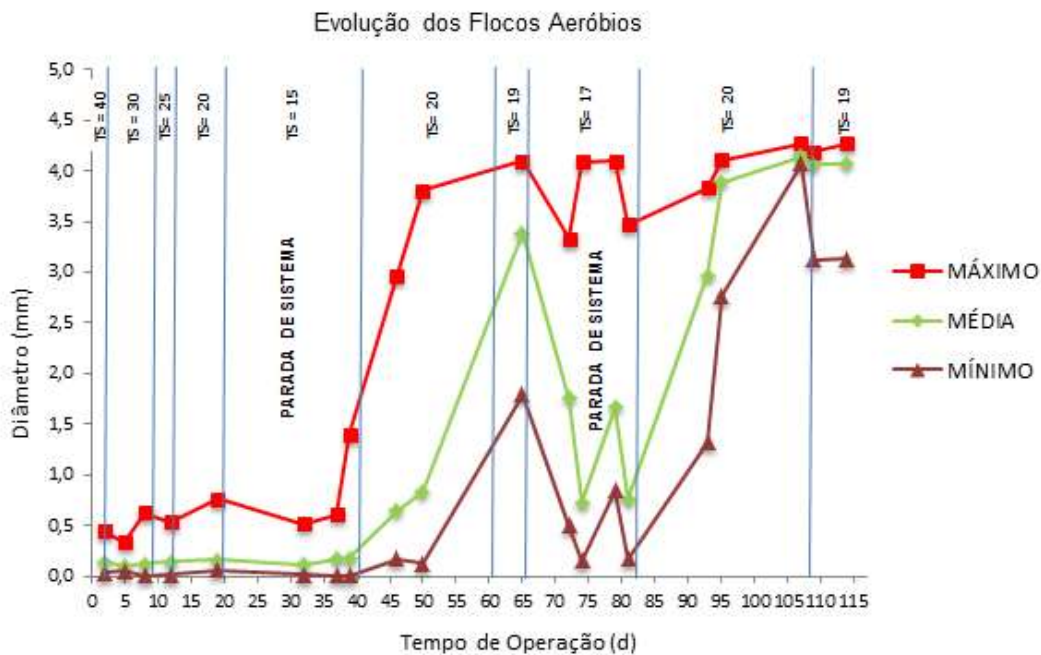


mudança foi prejudicial ao desenvolvimento dos grânulos, como pode ser visto na Figura 8, pois aos 81 dias de operação os mesmos haviam diminuído de tamanho, chegando-se a um diâmetro médio de  $0,77 \pm 1,1$ mm e máximo de 3,47mm. Essa diminuição do tamanho dos grânulos também pode estar correlacionada com a perda de sólidos biológicos no momento de descarte, pois os 17 minutos não eram suficientes para a sedimentação, retirando do sistema tanto os fragmentos ainda não agregados, quanto os grânulos em desenvolvimento, causando prejuízo ao processo de agregação da biomassa para que os flocos continuassem em desenvolvimento.

Com a perda de sólidos e a regressão do processo de granulação aeróbia, foi necessário, então, adicionar um novo inóculo de lodo ativado ao sistema piloto experimental e voltar ao Ts de 20 minutos. Assim, aos 95 dias de operação os flocos apresentaram diâmetro médio de  $3,89 \pm 0,46$ mm e máximo de 4,1mm, demonstrando uma boa recuperação do sistema em apenas 14 dias de operação, como pode ser observado na Figura 8. Permanecendo com Ts de 20 minutos, aos 107 dias de operação os flocos apresentaram diâmetro médio de  $4,14 \pm 0,05$ mm, e alto diâmetro mínimo, como se pode ver na Figura 6. Sendo assim, diminuiu-se o Ts para 19 minutos, e aos 114 dias de operação os flocos apresentaram diâmetro médio de  $4,07 \pm 0,4$ mm, demonstrando que os flocos não foram afetados pela diminuição do Ts.

**Tabela 54: Diâmetros dos flocos aeróbios durante a Investigação Experimental.**

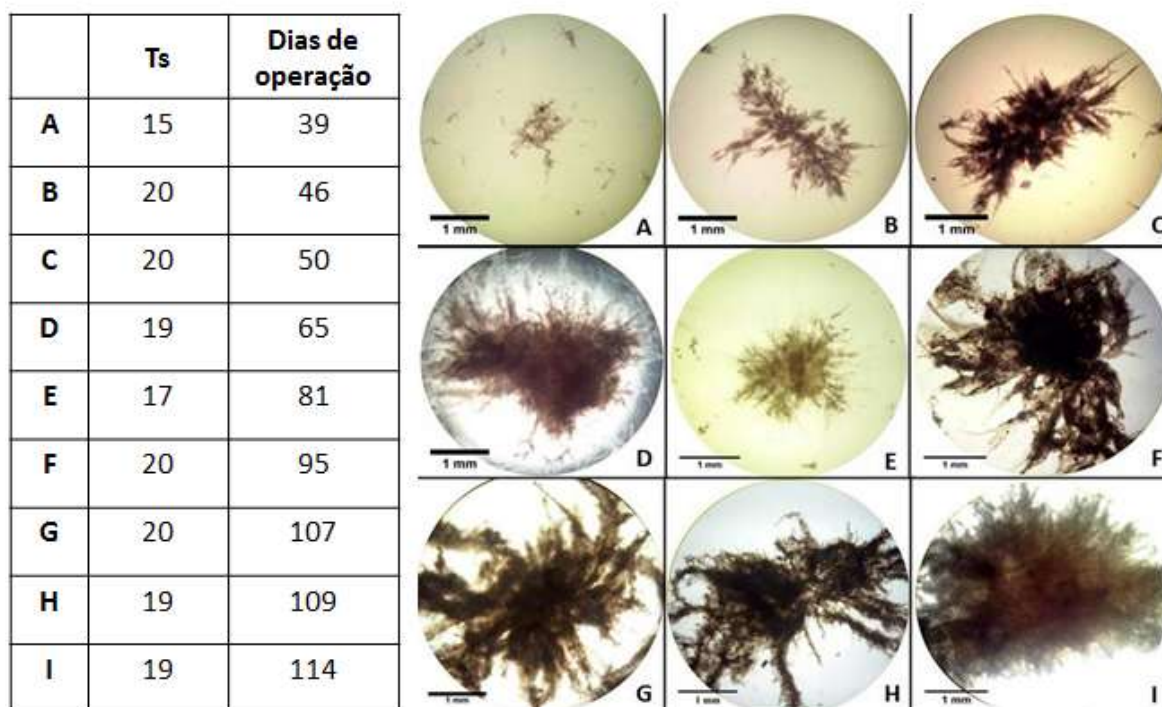
Investigação Experimental								
Dias de Operação	19	37	50	65	81	95	107	114
T <sub>s</sub> (min)	20	15	20	19	17	20	20	19
MÉDIA (mm)	0,16	0,17	0,84	3,39	0,77	3,89	4,14	4,07
MÁXIMO (mm)	0,76	0,65	3,80	4,10	3,47	4,10	4,27	4,27
MÍNIMO (mm)	0,06	0,01	0,13	1,79	0,17	2,77	4,07	3,13
DESVIO PADRÃO	0,2	0,1	0,94	0,68	1,1	0,46	0,05	0,4
CV (%)	131,7	70,3	111,5	20,2	143,8	11,8	1,26	9,66
AT	0,70	0,64	3,68	2,31	3,30	1,33	0,20	1,14
n	59	96	29	15	37	8	11	8



**Figura 6: Evolução dos flocos aeróbios durante as etapas da Fase de Aclimação e Investigação Experimental.**

A Figura 7-A corresponde ao floco aeróbio no Ts de 15 minutos aos 39 dias de operação do sistema. A Figura 7-B corresponde ao Ts de 20 minutos aos 46 dias de operação, onde nota-se que houve um aumento significativo do diâmetro do floco. A Figura 7-C mostra o floco quando operando o sistema com Ts de 20 aos 50 dias de operação, onde também se verifica que houve o aumento do diâmetro do mesmo. Aos 65 dias de operação e Ts de 19 minutos, os flocos sofreram um pequeno crescimento, se comparado à etapa anterior, porém o núcleo do floco estava mais compacto e a forma do mesmo também estava mais definida, como pode ser visto na Figura 7-D. Com 81 dias de operação e Ts de 17 minutos, o diâmetro dos flocos decresceram significativamente, como mencionado anteriormente, chegando próximo à forma de flocos aeróbios de sistemas de lodo ativado convencional, como pode ser observado na Figura 7-E.

Retomado o Ts de 20 minutos, aos 95 dias de operação os flocos voltaram a aumentar o seu diâmetro, conforme Figura 7-F. Aos 107 dias de operação e ainda com Ts de 20 minutos, a estrutura dos flocos permanecia sem alteração, com bastante filamentos, como pode ser visto na Figura 7-G. Com 109 dias de operação e Ts de 19 minutos, nota-se que houve a diminuição dos filamentos, conforme Figura 7-H. Finalmente, aos 114 dias de operação e ainda com Ts de 19 minutos, notou-se uma mudança significativa na estrutura dos flocos, pois a mesma apresentava-se mais agregada e definida, como pode ser visto na Figura 7-I.

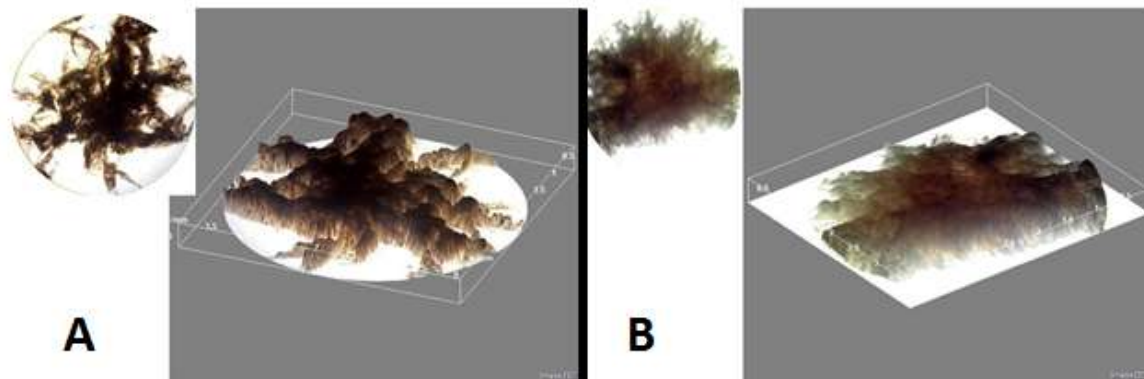


**Figura 7: Desenvolvimento dos Grânulos Aeróbios.**

Em termos de diâmetro, em estudos realizados com sistemas de LGA, a dimensão mínima dos grânulos foi estabelecida em 0,2mm (LEIRO, 2011). Porém, atender às dimensões não é o bastante, pois os grânulos devem ter forma redonda, lisa, regular, superfície exterior clara (LIU & TAY, 2004), e matriz coesa (NOR-ANUAR et al., 2012).

As etapas com Ts de 20 e 19 minutos, como já mencionado, foram as que obtiveram melhor desempenho em termos de diâmetro do floco, mas as formas dos mesmos não estavam arredondadas, e regulares. Com 95 dias de operação, o sistema havia retomado Ts de 20 minutos e com isto, os flocos regrediram no processo de formação dos mesmos, assemelhando-se a terceira etapa de formação do LGA, que consiste na formação de aglomerados filamentosos. Como se observa na Figura 8-A, neste estágio de desenvolvimento, a estrutura dos flocos não é regular e também não é arredondada, e há o início da formação do núcleo dos mesmos.

Retomando ao Ts de 19 minutos, aos 114 dias de operação parte dos flocos voltaram a apresentar estrutura mais compacta, regular e definida, com menor presença de filamentosas, como pode ser visto na Figura 8-B, embora ainda haja flocos com estruturas semelhantes à Figura 8-A.



**Figura 8-A2: Projeção em 3D da estrutura do floco aeróbio aos 95 dias de operação. Figura 8-B: Projeção em 3D da estrutura do floco aeróbio aos 114 dias de operação.**

### RESULTADOS DA ANÁLISE DE VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

A velocidade de sedimentação para formação do LGA foi monitorada a partir dos 50 dias de operação, quando o sistema experimental piloto estava operando com Ts de 20 minutos. Observou-se que de modo geral, quanto maior a concentração de lodo no reator, maior velocidade os flocos possuíam. Isto pode ser observado na Tabela 6, onde os maiores valores obtidos de velocidade, na faixa de 4 à 6m/h, foram quando a concentração de lodo no reator estava próxima a 3000kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 65: Velocidade de sedimentação do lodo biológico.**

Dias de operação	Tempo de Sedimentação (min)	Velocidade (m/h)	Concentração do lodo (mg/L)
50	20	3,0	1855
58	20	2,7	1920
67	17	2,8	1070
72	17	1,8	1410
78	17	1,3	912
96	20	5,5	1940
100	20	3,0	3055
101	20	4,4	3055
102	20	6,0	-
103	20	5,6	2980
105	20	4,2	-
106	20	4,2	-
107	20	4,3	2500
109	19	3,6	-
110	19	3,3	2175
116	19	3,4	2010

Na Figura 9 é possível verificar que os maiores valores obtidos para a velocidade de sedimentação foram durante o Ts de 20 minutos, aos 96 dias e 102 e 103 dias de operação. Também é possível verificar que o Ts de 17 minutos não foi favorável para o aumento da velocidade de sedimentação dos flocos, chegando aos valores mais baixos da série histórica.

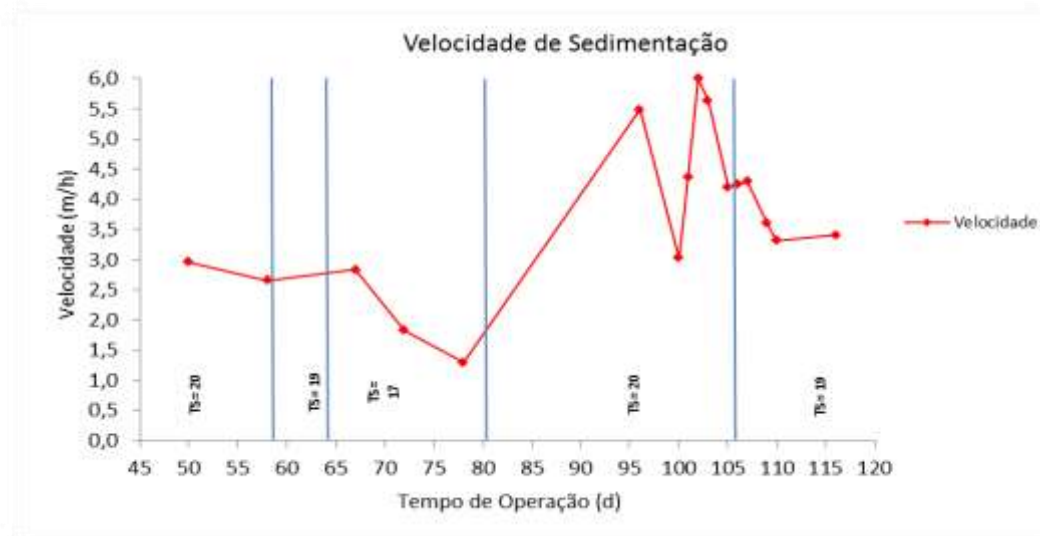


Figura 9: Velocidade de sedimentação dos flocos aeróbios.

Ressalta-se que próximo a essas amostragens que apresentaram maiores índices de velocidade, realizadas aos 96, 102 e 103 dias de operação, a estrutura dos flocos aeróbios estavam em desenvolvimento, apresentando diâmetros médios entre 3,89 e 4,14mm. Ou seja, pode-se verificar que quanto maior o diâmetro dos flocos, mais densos os mesmos estão, e conseqüentemente, possuem maior velocidade de sedimentação.

Porém, estes resultados comparados aos obtidos por Zhu et al. (2012) se mostraram inferiores, pois tais autores obtiveram velocidade de sedimentação de 23,9m/h quando operando o sistema com Ts de 20 minutos. Mas, tal fato pode ser explicado devido a esse estudo ser baseado em flocos aeróbios em processo de granulação, enquanto o estudo realizado por Zhu et al. (2012) considerou grânulos aeróbios já formados. Ainda assim, os flocos aeróbios apresentaram boas propriedades de sedimentação, pois comparados ao estudo realizado por Motta et al. (2003), em estações de tratamento de esgoto operadas com sistemas convencionais de lodos ativados, verificou-se velocidade de sedimentação máxima de 2,57m/h, valor este inferior aos obtidos neste estudo.

## RESULTADO DA ANÁLISE DO ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO

Neste estudo utilizou-se o  $IVL_{10}$  para análise das propriedades de sedimentação do lodo no sistema piloto experimental, conforme revisão da literatura (LEIRO, 2011). Este parâmetro começou a ser monitorado aos 50 dias de operação apresentando altos valores de IVL, e observa-se na Tabela 7 que o sistema operando com Ts de 17 minutos resultou em valores maiores de IVL, na ordem de 984mL/g aos 78 dias de operação, indicando que nesta etapa os flocos não estavam com boas propriedades de sedimentação. Na etapa seguinte, o IVL diminuiu para 292mL/g, indicando que, ao inocular o sistema e reiniciar sua operação operando com Ts de 20 minutos, os flocos se desenvolveram e melhoraram sua sedimentabilidade. Com isto, o IVL diminuiu, apresentando valor de 220mL/g aos 107 dias de operação. Aos 110 dias de operação e com Ts de 19 minutos, o IVL voltou a diminuir, chegando a 174,7mL/g, indicando que o lodo estava apresentando melhora em suas propriedades de sedimentação. Após isso, o IVL voltou a aumentar, chegando a 273,6mL/g. Isto pode estar relacionado ao fato do lodo flocoento estar flotando no reator, para posterior descarte.

Tabela 76: Índice volumétrico de lodo ( $IVL_{10}$ ).

Dias de operação (d)	50	58	67	72	78	96	103	107	110	113	115
Tempo de sedimentação (min)	20	20	17	17	17	20	20	20	19	19	19
SST (mg/L)	1855	1920	1070	1410	912	1940	2980	2500	2175	2055	2010
$IVL_{10}$ (mL/g)	439,2	381,3	665,0	548,5	983,7	292,4	201,3	220,0	174,7	262,8	273,6

Segundo Pivelli & Kato (2006), lodos considerados em boas condições de sedimentabilidade apresentam valores de IVL baixos. Por exemplo, sistemas de lodos ativados convencionais em boas condições de operação

devem apresentar IVL em torno de 100mL/g. Além disso, em estudos realizados por Zhu et al. (2012) operando um sistema com lodo granular aeróbio com Ts de 20 minutos, o IVL foi de 92mL/g. Portanto, conclui-se que embora tenha se alcançado IVL de 174,7mL/g, os valores obtidos ainda são considerados altos. Sendo assim, é possível verificar que os flocos aeróbios estão em desenvolvimento rumo ao processo de granulação aeróbia, atingindo até então, a terceira etapa do processo de formação dos grânulos aeróbios proposta por Beun et al. (1999), sendo possível, a formação de grânulos aeróbios se a operação do sistema for contínua.

## CONCLUSÕES

A realização deste estudo propiciou a obtenção de importantes resultados para compreensão do processo de formação de grânulos aeróbios. Em relação à caracterização morfológica, ao analisar os resultados obtidos durante a Fase de Aclimação e Investigação Experimental, concluiu-se que durante a Fase de Aclimação, os tempos de sedimentação de 40, 30 e 25 minutos foram necessários para adaptação do lodo aos baixos tempos de sedimentação para a granulação aeróbia.

Quando o sistema piloto experimental foi operado com tempo de sedimentação de 15 e 17 minutos, o mesmo se mostrou sensível em relação à diminuição do tempo de sedimentação, gerando perda excessiva de sólidos no descarte. Isto somado a problemas operacionais, que ocasionaram a falta de alimentação do sistema, fez com que fosse necessário inocular novamente o reator para reiniciar a operação.

No presente estudo, os tempos de sedimentação de 20 e 19 minutos propiciaram condições favoráveis ao desenvolvimento do processo de granulação aeróbia resultando em flocos com diâmetros de 4,2mm com estruturas semelhantes à terceira e quarta etapa de formação de grânulos aeróbios proposta por Beun et al. (1999), indicando que é possível alcançar a granulação aeróbia.

Em relação ao IVL, verifica-se que este parâmetro está correlacionado a concentração de sólidos no reator, bem como à velocidade de sedimentação dos flocos aeróbios, uma vez que os resultados obtidos neste estudo indicaram que quanto maior a concentração de sólidos no reator, maior será a velocidade de sedimentação dos flocos, e conseqüentemente, menor será o IVL.

Notou-se também que o sistema é sensível em relação à diminuição do tempo de sedimentação, sendo necessário que isto seja feito gradualmente em menores intervalos, devendo-se então, diminuir o tempo de sedimentação de 1 em 1 minuto. Além disso, segundo a revisão da literatura, o início da operação do sistema deve ser feita em temperaturas mais elevadas, ou seja, no verão, e neste estudo o sistema iniciou a operação no inverno. Tal fato também pode ter sido prejudicial ao processo de formação dos grânulos aeróbios.

Ressalta-se também que este estudo não atingiu o completo processo de granulação aeróbia devido às paradas de sistema e também pelo tempo de operação, uma vez que em escala real, se fez necessário 4 meses de operação sem interrupção para a formação do lodo granular aeróbio. Porém, embora operando aproximadamente por 4 meses, ocorreram paradas no sistema que causaram prejuízos significativos na evolução dos flocos aeróbios. Com isto, seria preciso então continuar a Investigação Experimental, bem como o monitoramento do sistema, necessitando também analisar o comportamento hidrodinâmico e a influência do oxigênio dissolvido na formação do lodo granular aeróbio, que não foi possível analisar neste estudo. Contudo, o sistema indica estar em evolução em relação ao processo de granulação aeróbia, sendo possível formar lodo granular aeróbio em um reator em bateladas sequenciais tratando esgoto sanitário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed., Washington, DC, USA. 2005.
2. BEUN, J. J., HENDRIKS, A., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., MORGENROTH, E., WILDERER, P. A., HEIJNEN, J. J. Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. Water Research, v. 33, nº. 10, p. 2283- 2290, 1999.
3. BUENO, R. F.; SUBTIL, E. L.; GASPAR, J. ; INÁCIO, A. R.; MOURÃO, R. F. Caracterização de flocos de lodo ativado por meio de análise de imagem: padronização e validação do método. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia. 27º CBESA, 2013.

4. CAMPOS, José Roberto ; PRADO, Gustavo Silva. O emprego da análise de imagem na determinação da distribuição de tamanho de partículas da areia presente no esgoto sanitário. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, vol. 14, nº 3, p.401-410, 2009.
5. DE KREUK, M.K.; PRONK, M.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures. Water Research, vol. 39, p. 4476-4484, 2005.
6. DE KREUK, Merle Krista. Aerobic granular sludge scaling up a new technology. Tese (Ph.D. em Engenharia Agrícola), Delft University of Technology, Delft, 2006.
7. LEIRO, Mónica Figueroa. Aerobic Granular Systems for biological treatment of industrial wastewater: Operation and Characterization of microbial populations. Dissertação (PhD em Engenharia Química e Ambiental) – Programa de Doutorado em Engenharia Química e Ambiental, Universidade de Santiago de Compostela, La Coruña, 2011.
8. LIU, Yu; TAY, Joo-Hwa. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment. Biotechnology Advances, vol. 22, p. 533-563, 2004.
9. MORAIS, I.L.H. Tratamento com lodo aeróbio granular de efluente de fábrica de papel. Tese (Magister Scientiae) – Programa de Pós – graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
10. MOTTA, M.; PONS, M-N; ROCHE, N.; VIVIER, H.; AMARAL, A. L.; FERREIRA, E. C.; MOTA, M. Estudo do funcionamento de tratamento de esgotos por análise de imagem: validações e estudo de caso. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol.8, nº 3, p. 170-181,2003.
11. NI, Bing-Jie; XIE, Wen-Ming; LIU, Shao-Gen; YU, Han-Qing; WANG, Ying-Zhe; WANG, Gan; DAI, Xian-Liang. Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater. Water Research, vol. 43, p. 751-761, 2009.
12. NI, Bing-Jie; YU, Han-Qing. Growth and Storage Processes in Aerobic Granules Grown on Soybean Wastewater. Biotechnology and Bioengineering, vol. 100, nº 4, p. 664-672, 2008.
13. NOR-ANUAR, A.; UJANG, Z.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; DE KREUK, M. K.; OLSSON, G. Strength characteristics of aerobic granular sludge. Water Science & Technology, vol. 65, p. 309-316, 2012.
14. PEREZ, Y. G.; LEITE, S. G. F.; COELHO, M. A. Z. Activated Sludge Morphology Characterization Through an Image Analysis Procedure. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 23, n. 03, p. 319 - 330, 2006.
15. PIVELLI, Roque Passos; KATO, Mario Takayuki. Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental -- São Paulo: ABES, 2005.
16. TAY, J.-H., LIU, Q.-S. LIU, Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor. Journal of Applied Microbiology, vol. 91, p. 168-175, 2001.
17. TAY, Joo-Hwa; PAN, Shun; HE, Yanxin; TAY, Stephen Tiong Lee. Effect of Organic Loading Rate on Aerobic Granulation. I: Reactor Performance. Journal of Environmental Engineering, outubro de 2004, p. 1094-1101, 2004.
18. WAGNER, Jamille. Desenvolvimento de grânulos aeróbios e tratamento de esgoto doméstico em um reator em bateladas sequenciais (RBS) sob diferentes condições operacionais. Dissertação (Pós – graduação em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
19. WAGNER, Jamille; PACHECO, Renata Martins; GOMÉZ, José Luís Campos; DA COSTA, Rejane Helena Ribeiro. Efeito do tempo de sedimentação na morfologia dos grânulos aeróbios desenvolvidos em um reator operado em bateladas sequenciais. Anais do 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011, Porto Alegre. 26º CBESA, 2011.
20. ZHU, Liang; DAÍ, Xin; LV, Meile; XU, Xiangyang. Correlation analysis of major control factors for the formation and stabilization of aerobic granule. Environmental Science and Pollution Research, 07 de outubro, 2012.