

HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI

**USO DE TALCO NO CONTROLE DO INTUMESCIMENTO FILAMENTOSO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FÁBRICA DE PAPEL RECICLADO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência Florestal, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R838u
2007

Rossoni, Hygor Aristides Victor, 1980-

 Uso do talco no controle do intumescimento filamentososo
no tratamento de efluente de fábrica de papel reciclado /
Hygor Aristides Victor Rossoni. – Viçosa, MG, 2007.
 xv, 93f. : il. ; 29cm.

Orientador: Cláudio Mudado Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 90-93.

1. Resíduos de papel - Reaproveitamento. 2. Lodo
filamentoso. 3. Talco. 4. Floculação. 5. Águas residuais –
Purificação - Processo de lodo ativado. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9861

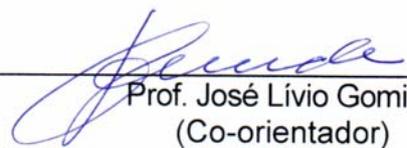
HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI

**USO DE TALCO NO CONTROLE DO INTUMESCIMENTO FILAMENTOSO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FÁBRICA DE PAPEL RECICLADO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência Florestal, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de maio de 2007.


Prof^a. Ann Honor Munteer
(Co-orientadora)


Prof. José Lívio Gomide
(Co-orientador)


Prof^a. Ana Augusta Passos Rezende


Prof^a. Mônica de Abreu Azevedo


Prof. Cláudio Mudado Silva
(Orientador)

METADE

Composição: Oswaldo Montenegro

*Que a força do medo que tenho
não me impeça de ver o que anseio
que a morte de tudo em que acredito
não me tape os ouvidos e a boca
pois metade de mim é o que eu grito
mas a outra metade é silêncio.
Que a música que ouço ao longe
seja linda ainda que tristeza
que a mulher que eu amo seja pra sempre amada
mesmo que distante
porque metade de mim é partida
mas a outra metade é saudade.
Que as palavras que falo
não sejam ouvidas como prece nem repetidas com fervor
apenas respeitadas como a única coisa
que resta a um homem inundado de sentimento
porque metade de mim é o que ouço
mas a outra metade é o que calo
Que essa minha vontade de ir embora
se transforme na calma e na paz que eu mereço
que essa tensão que me corrói por dentro
seja um dia recompensada
porque metade de mim é o que penso
e a outra metade um vulcão.
Que o medo da solidão se afaste
que o convívio comigo mesmo se torne ao menos suportável
que o espelho reflita em meu rosto um doce sorriso
que me lembro ter dado na infância
porque metade de mim é a lembrança do que fui
e a outra metade não sei
Que não seja preciso mais que uma simples alegria
pra me fazer aquietar o espírito
e que o teu silêncio me fale cada vez mais
porque metade de mim é abrigo
mas a outra metade é cansaço
Que a arte nos aponte uma resposta
mesmo que ela não saiba
e que ninguém a tente complicar
porque é preciso simplicidade pra fazê-la florescer
porque metade de mim é platéia
e a outra metade é a canção
E que a minha loucura seja perdoada
porque metade de mim é amor
e a outra metade também.*

DEDICO,

À Fernandinha, por ser a minha metade.

À minha mamãe, Anasir, e ao meu papai, Joamyr, pelo amor incondicional.

Aos meus irmãozinhos, Joamyr, Galvão, Rafa, João Paulo e Roberto, pelo apoio a qualquer hora.

A toda minha família, pela torcida e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção em todos os momentos da minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Celulose e Papel pela oportunidade oferecida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

Ao professor Cláudio Mudado Silva pela valiosa orientação e grandiosa dedicação em todos os momentos acadêmicos, pela amizade e confiança.

Aos conselheiros Prof. José Lívio Gomide e Prof^a. Ann Honor Mounteer pelas sugestões e pela amizade.

Aos demais membros da banca examinadora, professoras Mônica de Abreu Azevedo e Ana Augusta Passos Rezende pelo tempo dedicado e pela atenção.

Aos amigos, Cláudio Arcanjo (Canjão) e Nívea (irmãzinha) pelo aconselhamento e pelas valiosas sugestões desde a etapa de elaboração, que foram fundamentais para execução deste trabalho.

À minha linda, Fernanda Fonseca Pessoa (Fernandinha do Hygão) que, além de ter sido a minha fonte de inspiração, foi quem, por meio de exaustivas e sucessivas leituras, contribuiu preciosamente na redação e correção ortográfica dessa dissertação.

Aos colegas do curso de pós-graduação pelo carinho e amizade e aos estudantes e estagiários José Antônio e Thales pela ajuda nas análises de rotina.

Ao Prof. Fabyano Fonseca e Silva, do Departamento de Informática, pelo precioso aconselhamento no tratamento estatístico dos dados.

Aos professores do Laboratório de Celulose e Papel pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas.

À Xilolite S. A. pela proposta do projeto e pelo fornecimento das amostras de talco e, em especial, aos engenheiros Silvano e Flávia pela ajuda com informações no decorrer do trabalho.

À Klabin Papeis e Embalagens Unidade Ponte Nova pela liberação dos efluentes e demais informações valiosas para a execução deste trabalho.

A todos do Laboratório de Celulose e Papel que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho, principalmente aos colegas Ana Paula, Ana Márcia, André von Tiesenhausen, Arcanjo (Canjão), Bittencourt, Carla, Carlinhos, Cirinho, Conceição, Cristiane, Dalton, Dora, Edinho, Eliane, Fred, Ismarley, Jairo (irmão), Juliana, Luiz Felipe (carioca), Marcos (Marcão), Mateus Amaral, Matheus Coura, Miele, Nelson (fiote), Nívea, Odair, Onel, Paulo Henrique, Rafael, Ricardo, Rose, Valéria, Vanessa e Wilian pela amizade, pelo companheirismo e pela grande colaboração no desenvolvimento das pesquisas.

Aos amigos e amigas das Repúblicas Dr. Joaquim (Galvão, Rafa, João Paulo e Roberto) e Jardim das Delícias (Fê, Nanda, Cyn, Let's, Li e Dona Mary), Dri e Patty, pela convivência especial.

Ao diretor, da Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal, Prof. Antônio César Pereira Calil, por ter facilitado e apoiado a minha liberação das atividades para a conclusão do treinamento.

À colega e Prof^a. Maria Luiza Leão, pela colaboração no remanejamento do horário das aulas, o que tornou menos árdua as idas a Viçosa.

Às secretárias Rita de Cássia Xavier Garcia e Maria Lúcia de Paula, pela atenção e dedicação quanto às minhas solicitações.

Aos professores Ana Tereza, Walter, Adilson e Franceline, pelas caronas, generosidade e companhia, o que foi fundamental durante o período de conclusão deste trabalho.

Aos professores e colegas da Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal pelas palavras de força e incentivo.

Finalmente, a todas as pessoas que, de algum modo, contribuíram para que meu objetivo fosse alcançado.

BIOGRAFIA

HYGOR ARISTIDES VICTOR ROSSONI, filho de Joamyr Rossoni e Anasir Victor Rossoni, nasceu na cidade de Itaguaçu, ES, no dia três de junho de 1980.

Em fevereiro de 1996, iniciou o Curso Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Colatina, ES, concluindo-o em dezembro de 1998.

Em fevereiro de 2000, iniciou o Curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, graduando-se em fevereiro de 2005.

Em março de 2005, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, na área de Celulose e Papel, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo os requisitos indispensáveis para obtenção do título de *Magister Scientiae* no primeiro semestre de 2007.

Em agosto de 2006, ingressou, por concurso público, na Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal, para o cargo de professor da área de Meio Ambiente.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Tratamento de efluentes em indústrias de celulose e papel	4
2.1.1. Princípios do tratamento biológico	5
2.1.2. Processo de lodos ativados	7
2.1.3. Reator em batelada seqüencial (RBS).....	8
2.2. Microbiologia.....	10
2.3. A formação do floco e o intumescimento do lodo	12
2.4. Índice volumétrico do lodo	16
2.5. Uso substâncias que aumentam a sedimentabilidade do lodo	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Coleta, preservação e preparo dos efluentes	20
3.1.1. Coleta do lodo biológico	21
3.2. Caracterização físico-química dos efluentes	21
3.3. Caracterização físico-química dos talcos.....	22
3.4. Estratégia Experimental.....	23
3.4.1. FASE PRELIMINAR.....	23
3.4.1.1. Identificação da bactéria causadora do intumescimento filamentoso	23

3.4.1.2. Seleção do melhor talco	26
3.4.2. Determinação das melhores dosagens de talco e sua influência no sistema de tratamento biológico.....	27
3.4.2.1. FASE 1: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção da θ_c constante	27
3.4.2.2. FASE 2: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante	28
3.5. Reatores em Batelada Seqüencial (RBS).....	28
3.6. Ajuste do lodo biológico	30
3.7. Tratamento biológico de efluentes	30
3.8. Procedimentos analíticos.....	32
3.9. Parâmetros operacionais dos RBS	32
3.9.1. Concentração de biomassa no reator biológico	32
3.9.2. Índice volumétrico do lodo (IVL).....	33
3.9.3. Idade do lodo (θ_c).....	34
3.9.4. Relação A/M.....	35
3.9.5. Eficiência do tratamento biológico.....	36
3.10. Programa de amostragem e métodos analíticos	36
3.11. Equipamentos utilizados	37
3.12. Análises estatísticas	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1. FASE PRELIMINAR.....	40
4.1.1. Análise do floco biológico e identificação dos microrganismos causadores do intumescimento do lodo.....	40
4.1.2. Seleção do melhor talco.....	42
4.2. Avaliação e determinação das dosagens ótimas do talco escolhido no controle do intumescimento do lodo	44
4.2.1. FASE 1: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção da θ_c constante	44
4.2.1.1. Análise quantitativa do IVL	44
4.2.1.2. Análise qualitativa do IVL	56
4.2.1.3. Análises microscópicas e composição biológica do lodo.....	59
4.2.1.4. Avaliação da eficiência do sistema de tratamento	63

4.2.2. FASE 2: Aplicações sucessivas de talco com controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante.....	70
4.2.2.1. Análise quantitativa do IVL	71
4.2.2.2. Análise qualitativa do IVL	76
4.2.2.3. Análises microscópicas e composição biológica do lodo.....	78
4.2.2.4. Avaliação da eficiência do sistema de tratamento	80
5. CONCLUSÕES	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

LISTA DE SÍMBOLOS

A/M	=	relação alimento/microrganismo, kg DBO ₅ .kg SSV.d ⁻¹
CE	=	condutividade elétrica, mS.cm ⁻¹
DBO ₅	=	demanda bioquímica de oxigênio, mg.l ⁻¹
DQO	=	demanda química de oxigênio, mg.l ⁻¹
ETE	=	estação de tratamento de efluentes
IC	=	intervalo de confiança
IVL	=	índice volumétrico do lodo, ml.g ⁻¹
P _{total}	=	fósforo total, mg.l ⁻¹
N _{total}	=	nitrogênio total, mg.l ⁻¹
SDT	=	sólidos dissolvidos totais, mg.l ⁻¹
SST	=	sólidos suspensos totais, mg.l ⁻¹
SSFTA	=	sólidos suspensos fixos no tanque de aeração, mg.l ⁻¹
SSTTA	=	sólidos suspensos totais no tanque de aeração, mg.l ⁻¹
SSVTA	=	sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração, mg.l ⁻¹
OD	=	oxigênio dissolvido, mg.l ⁻¹
P _{total}	=	fósforo total, mg.l ⁻¹
RBS	=	reator em batelada seqüencial
R ²	=	coeficiente de determinação
T1	=	tratamento controle
T2	=	tratamento 25% talco
T3	=	tratamento 50% talco
T4	=	tratamento 75% talco

T5	=	tratamento 100% talco
TP1	=	tratamento preliminar controle
TP2	=	tratamento preliminar 25% talco
TP3	=	tratamento preliminar 50% talco
TP4	=	tratamento preliminar 100% talco
θ_c	=	Idade do lodo, d

RESUMO

ROSSONI, Hygor Aristides Victor, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2007. **Uso de talco no controle do intumescimento filamentoso no tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado.** Orientador: Cláudio Mudado Silva. Co-orientadores: Ann Honor Mounteer e José Lívio Gomide.

A otimização e o monitoramento dos parâmetros operacionais de uma estação de tratamento de efluentes industriais tornam-se necessários para o perfeito equilíbrio do sistema e para a manutenção da eficiência de redução de poluentes a níveis compatíveis com a legislação vigente. Um dos principais problemas operacionais existentes em um sistema de tratamento biológico por lodos ativados é a baixa sedimentabilidade do lodo biológico nos decantadores secundários. Esta má decantabilidade geralmente está associada ao crescimento excessivo das bactérias filamentosas em relação às formadoras de flocos, o que acarreta o intumescimento do lodo, comumente chamado de *bulking* filamentoso. No Brasil, diversas fábricas de celulose e papel têm enfrentado problemas nas estações de tratamento devido à má decantabilidade do lodo biológico, acarretando, principalmente, a perda de eficiência de remoção da demanda química de oxigênio, demanda bioquímica oxigênio e a perda de sólidos no decantador secundário. A adição de agentes que aumentam a densidade do floco básica da adição do talco é aumentar o tamanho e peso do floco, melhorando a sua sedimentabilidade. O objetivo deste estudo foi testar o uso de talco para o controle do intumescimento filamentoso do lodo. O lodo biológico utilizado possuía alto teor de bactérias filamentosas da espécie TIPO 021N e foi obtido de uma fábrica de papel reciclado. O experimento consistiu de um sistema de

batelada, operado com uma idade de lodo de dez dias. Foram construídos cinco reatores biológicos e dosadas diferentes concentrações de talco: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em relação aos sólidos suspensos totais no tanque de aeração. As análises realizadas foram série de sólidos, índice volumétrico do lodo e demanda química de oxigênio. Adições sucessivas de talco contribuem para a redução do índice volumétrico do lodo, sendo que as dosagens de 75% e 100% foram as mais eficientes. A presença do talco não interferiu na atividade biológica. No entanto, um dos problemas observados foi um elevado aumento na concentração de sólidos suspensos totais no tanque de aeração, sendo necessário maior descarte de lodo para a manutenção de condições operacionais. A adição do talco teve efeito temporário, sendo necessárias adições repetidas para a manutenção do índice volumétrico do lodo baixo.

ABSTRACT

ROSSONI, Hygor Aristides Victor, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, May of 2007. **Use of talc for filamentous bulking control in effluent treatment plant of a recycled paper mill.** Adviser: Cláudio Mudado Silva. Co-advisers: Ann Honor Mounteer and José Lívio Gomide.

One of the main existing operational problems in activated sludge effluent treatment processes is the poor sedimentation of the biological sludge in the secondary clarifiers. This poor settleability of the sludge is, generally, associated with excessive growth of filamentous bacteria in the bioreactor causing sludge filamentous bulking. In Brazil, many pulp and paper mills have faced problems related to sludge filamentous bulking in their effluent treatment plants experiencing a significant reduction in COD and BOD removal efficiency and a loss of suspended solids in the treated effluent. The addition of talc to increase floc density for the control of filamentous *bulking* has been studied. The basic function of talc addition is to increase the size and weight of the floc to improve its settleability. The objective of this study was to test the use of talc for the control of filamentous bulking. The bio-sludge used was obtained from a recycling paper mill and had an abundance of filamentous bacteria Type 021N. The experiment consisted of five bioreactors operating batch wise with sludge age of ten days. Different talc applications were used: 0%, 25%, 50%, 75% and 100% in relation to the total suspended solids in the aeration tank. The following analyses were carried out to monitor the system: suspended solids, sludge volumetric index (SVI) and chemical oxygen demand. Successive additions of talc contributed for the reduction of IVL. Dosages of 75% and 100% showed to be most efficient to

improve settleability of the sludge. The presence of talc did not interfere with biological activity of the sludge. However, it was observed an increase of the total suspended solid concentration in the aeration tank. The addition of talc had a temporary effect on sludge settleability, so it was necessary to add repeatedly talc in the reactor in order to maintain a low sludge volumetric index.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as fábricas de celulose e papel vêm buscando reduzir o consumo de água e, conseqüentemente, o volume gerando de efluentes líquidos a serem tratados e lançados no meio ambiente. Não somente por pressões ambientais, mas, sobretudo por questões econômicas, tais esforços tendem a ser intensificados em um futuro próximo.

Os efluentes provenientes de fábricas de papel, que apresentam um alto teor de matéria orgânica coloidal e dissolvida, quando lançados sem tratamento nos corpos d'água receptores, causam vários impactos ambientais negativos como, por exemplo, a depleção de oxigênio, que pode acarretar a morte de organismos aeróbios e tornar os corpos receptores impróprios para a biota aquática.

Por apresentar uma concentração de matéria orgânica biodegradável relativamente alta, o efluente deve ser tratado por meio de processos biológicos para que esta matéria orgânica coloidal e dissolvida seja removida. No tratamento biológico, microrganismos utilizam a matéria orgânica como fonte de carbono e energia para a síntese de novas células.

O processo de tratamento dos efluentes de fábricas de celulose e papel mais comumente utilizados no mundo é o processo de lodos ativados. Este consiste basicamente de um reator aeróbio, onde ocorre a oxidação da matéria orgânica e a síntese de novas células na presença de uma população diversificada de microrganismos (biomassa), formada principalmente por bactérias, protozoários, rotíferos e fungos, seguido de um decantador secundário

que separa a fase líquida da fase sólida e uma linha de recirculação do lodo do decantador secundário para o reator, que tem como objetivo manter uma elevada concentração de biomassa no reator biológico.

O metabolismo do substrato orgânico, que ocorre no reator biológico, leva ao desenvolvimento dos microrganismos que se aglutinam, formando uma unidade estrutural denominada floco, posteriormente separado do efluente tratado na etapa de sedimentação. Uma boa separação nessa etapa depende das características dos flocos formados.

O floco é uma estrutura heterogênea, composta por microrganismos e material orgânico diverso. As condições que levam ao crescimento aglomerado dos microrganismos ainda não estão bem esclarecidas. No entanto, o que se sabe é que as bactérias filamentosas funcionariam como uma espécie de esqueleto estrutural, ao qual as bactérias formadoras de floco se aderem, provavelmente, por meio de exopolissacarídeos, presentes na forma de cápsula ou camada gelatinosa.

Um problema operacional bastante comum nos sistemas de lodos ativados está relacionado à separação da biomassa microbiana do meio líquido no decantador secundário, sendo este problema principalmente relacionado aos parâmetros biológicos, ou seja, com a formação de flocos de biomassa.

Quando o lodo biológico apresenta um equilíbrio entre as bactérias filamentosas e as formadoras de flocos, a biomassa é separada do efluente com facilidade. Por outro lado, havendo pouca ou nenhuma ocorrência de bactérias filamentosas, o floco perde sua resistência às tensões de cisalhamento provocadas pela turbulência da aeração, dando origem a um floco pequeno e frágil, de difícil decantação. Lodos biológicos com predominância dos organismos filamentosos levam ao aparecimento de flocos volumosos e de difícil separação no decantador secundário. Este fenômeno é conhecido como intumescimento do lodo, ou na expressão inglesa: “*bulking*” filamentoso.

O floco biológico intumescido é menos denso e não sedimenta na unidade de decantação secundária, levando, assim, a perdas de biomassa no efluente tratado e menor eficiência na remoção de compostos orgânicos, o que resulta em baixa qualidade do efluente tratado.

Existem diversos estudos envolvendo o controle do intumescimento do lodo, que consistem, principalmente, em corrigir as causas do crescimento

excessivo das bactérias filamentosas ou em criar condições favoráveis ao crescimento das bactérias formadoras de flocos. Como exemplo de uso de medidas preventivas no controle do intumescimento do lodo, pode-se citar a otimização de parâmetros operacionais da estação de tratamento de efluentes (ETE), como: idade do lodo, controle de pH, concentração de nutrientes, uso de seletores biológicos etc.

Já em casos em que ocorre o intumescimento severo do lodo pode ocorrer a perda da eficiência de tratamento e de clarificação do efluente tratado. Neste caso, os usos de medidas agudas que aumentam prontamente a sedimentabilidade do lodo tornam-se necessárias. Dentre essas medidas, podem ser citadas uso de agentes biocidas (compostos oxidantes), agentes lastrantes (talco) e agentes floculantes e coagulantes (polímeros sintéticos).

A função básica da adição do talco no reator biológico em um tratamento de efluentes por lodos ativados é aumentar a densidade e o tamanho do floco biológico, melhorando a sedimentação do lodo na unidade de decantação.

Apesar de alguns estudos mostrarem uma expressiva influência do talco no controle do “*bulking*” filamentoso, por meio da redução do índice volumétrico do lodo (IVL), o número de trabalhos dedicados a este tema ainda é muito reduzido, mesmo em nível mundial, sendo esta carência ainda mais expressiva para as condições brasileiras. Além disso, existe uma deficiência de informações sobre o melhor tipo de talco, sua dosagem ótima e o efeito dele sobre população microbiológica do tratamento de efluentes.

Diante disso, o principal objetivo do presente trabalho foi o de testar o uso de talco para o controle do intumescimento filamentoso do lodo biológico de um sistema de tratamento de efluentes de uma Indústria de Papel Reciclado. Buscou-se avaliar as concentrações ou dosagens ótimas de aplicação do talco e verificar o seu efeito sobre o sistema de tratamento de efluentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tratamento de efluentes em indústrias de celulose e papel

Os processos empregados em tratamento de águas residuárias dependem das características do afluente, da qualidade requerida para o efluente, dos custos operacionais, da viabilidade do terreno e das exigências futuras da qualidade da água padrão (VON SPERLING, 1996).

Em fábricas de celulose e papel, o tratamento de efluentes líquidos é basicamente composto por tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário, podendo conter, ainda, um tratamento terciário que visa à remoção de cor e de um polimento do efluente proveniente do tratamento secundário. Normalmente, nestas fábricas, o tratamento secundário é suficiente para enquadrar os seus efluentes nos limites de lançamento, sendo o tratamento terciário raramente adotado (SILVA, 1999).

Dois tipos de tratamentos preliminares são adotados em fábricas de produção de celulose e papel: o resfriamento do efluente e a remoção dos sólidos grosseiros.

O tratamento primário visa à remoção de sólidos em suspensão. Este é, normalmente, efetuado por meio de decantação por gravidade, e, em alguns casos, por meio de flotação, atingindo, neste processo, uma remoção maior que 80% dos sólidos em suspensão.

Em um tratamento secundário ou biológico, o objetivo principal é a remoção da matéria orgânica biodegradável, ocorrendo, muitas vezes, também a remoção de compostos organoclorados e toxicidade.

2.1.1. Princípios do tratamento biológico

São considerados biológicos os processos que dependem da ação de microrganismos e que procuram reproduzir, em dispositivos racionalmente projetados, os fenômenos observados na natureza, condicionando-os em espaço e tempo economicamente viáveis.

No tratamento biológico, o substrato serve como fonte de energia e carbono para os microrganismos. Sob condições aeróbias, a biodegradação normalmente resulta na mineralização total do substrato com produção de dióxido de carbono, água, amônia e novas células.

O mecanismo de utilização de substrato pelos microrganismos pode ser descrito por três processos complexos: contato das células com substrato; transporte de moléculas para o interior das células; e metabolismo completo ou intermediário do substrato. Moléculas grandes têm que ser quebradas ou transformadas externamente por enzimas extracelulares ou por enzimas conjugadas às paredes celulares (NOLASCO, 1997).

As reações químicas que ocorrem simultaneamente na célula são o catabolismo, reação de produção de energia, no qual ocorre a degradação do substrato e o anabolismo, reação que conduz à formação de material celular (crescimento) com o auxílio da energia liberada na desassimilação.

Em ambas as categorias, as transformações químicas ocorrem numa seqüência de diversas e complexas reações intermediárias, cada qual canalizada por um tipo específico de enzima. As reações aeróbias para a estabilização da matéria orgânica carbonácea ocorrem em três etapas simultaneamente:

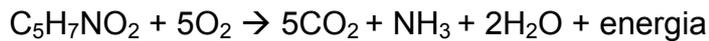
Etapa inicial: Oxidação (produção de energia)



Etapa assimilatória: Síntese (produção de material celular)



Etapa endógena: Auto-oxidação



A compreensão da microbiologia no tratamento de efluentes é, portanto, essencial para a otimização do projeto e operação dos sistemas de tratamento biológico. Os principais organismos envolvidos no tratamento são bactérias, protozoários, fungos, e algas. As bactérias são as mais importantes na estabilização da matéria orgânica. Elas constituem-se no grupo de maior presença e importância nos sistemas de tratamento biológico. Considerando-se que a principal função de um sistema de tratamento é a remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), as bactérias heterotróficas são os principais agentes deste mecanismo.

A eficiência nos processos de tratamento biológico é dependente da temperatura. Esta variável não só influencia nas atividades metabólicas dos microrganismos, como também causa efeitos nas taxas de transferências de gases e altera as características dos sólidos biológicos (METCALF e EDDY, 2003). A temperatura ideal em plantas de lodos ativados para efluentes de indústria de celulose e papel é entre 35 – 37°C, havendo a necessidade de um resfriamento para efluentes com temperatura superior a 40°C.

O pH também é um fator importante no crescimento bacteriano. A maior parte das bactérias não sobrevive em valores de pH acima de 9,5 e abaixo de 4,0, sendo que o pH ótimo se situa em torno da neutralidade (6,5 a 7,5) (METCALF e EDDY, 2003).

Alguns compostos tóxicos, tais como fenóis, organoclorados, cianetos, sulfetos e metais pesados, acima de certas concentrações podem inibir o crescimento bacteriano. Na maioria dos casos, uma população de bactérias pode ser aclimatada na presença de um composto tóxico e aprender a tolerá-lo em concentrações mais altas, sem inibição (SPRINGER, 1993).

Os macronutrientes nitrogênio e fósforo são essenciais para se obter sucesso num sistema de tratamento biológico, outros macronutrientes necessários são carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre. Os micronutrientes essenciais ao processo incluem ferro, manganês, cobre, cobalto, magnésio, potássio e cálcio.

Em geral, os efluentes da indústria de celulose e papel contêm quantidades suficientes desses micronutrientes, porém eles requerem a adição de certas quantidades de nitrogênio (N) e fósforo (P), o que, em sistemas convencionais de lodos ativados, obedece à relação $DBO_5:N:P$ igual a 100:5:1 (SPRINGER, 1993). A quantidade de nitrogênio e fósforo requerida para alcançar um tratamento eficiente é calculada a partir da relação estequiométrica da matéria orgânica presente no efluente que está sendo degradada com a biomassa produzida (GRADY *et al.*, 1999).

2.1.2. Processo de lodos ativados

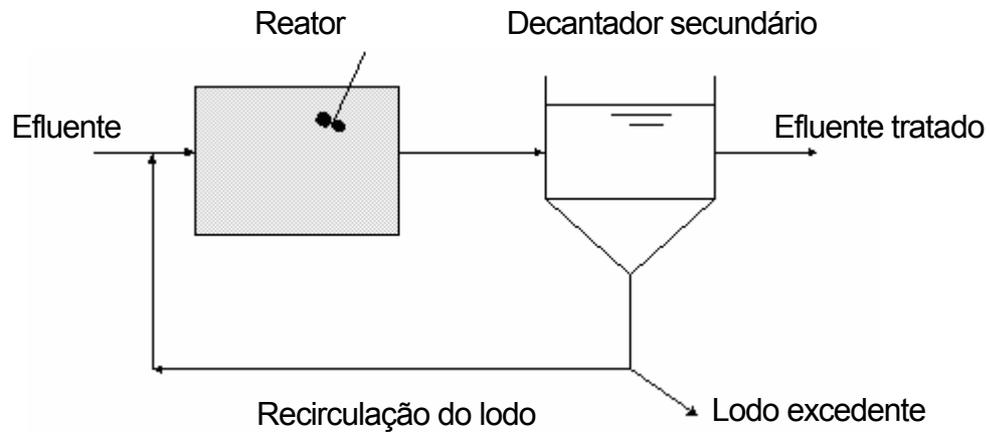
O sistema de tratamento por lodos ativados é um tratamento biológico amplamente utilizado para o tratamento de efluentes domésticos e industriais. A utilização é justificada pelo fato do sistema gerar um efluente de boa qualidade em reduzidos requisitos de área (VON SPERLING, 1997).

O efluente de fábricas de celulose e papel contém poucos microrganismos para permitir uma degradação/conversão rápida e eficiente da matéria orgânica. O processo de lodos ativados supera essa dificuldade mantendo uma grande quantidade de microrganismos presentes no taque de aeração, acelerando o processo de degradação (EIKELBOOM, 2000).

O processo foi desenvolvido em 1914 na Inglaterra por Arden e Lockett (METCALF e EDDY, 2003). O sistema se baseia no princípio de manter uma concentração de bactérias ativas (lodo ativo) produzidos no sistema. Portanto é feita uma recirculação do lodo para manter a maior concentração de microrganismos ativos no reator biológico, a fim de acelerar a remoção de material orgânico das águas residuárias (CAMPOS, 2002).

A variante básica do sistema de lodos ativados é constituída de um reator ou tanque de aeração, e de um tanque de decantação (decantador secundário) integrado a um sistema de recirculação do lodo, como mostrado na Figura 2.1. No reator acontece a remoção da matéria orgânica carbonácea, podendo haver também a remoção da matéria nitrogenada. O metabolismo do substrato orgânico leva ao desenvolvimento dos microrganismos, que se aglutinam, formando uma unidade estrutural denominada floco, posteriormente separada do efluente tratado

na etapa de sedimentação. Uma boa separação nessa etapa depende das características dos flocos formados.



Fonte: VON SPERLING (1997).

Figura 2.1 – Fluxograma típico de um sistema de lodos ativados convencional.

Parte da biomassa sedimentada no fundo do decantador secundário é recirculada para o reator, aumentando a sua concentração de sólidos e elevando a eficiência do sistema (VON SPERLING, 1997; METCALF e EDDY, 2003).

A parte do lodo retirada do sistema passa por etapas de tratamento, como adensamento, estabilização e desidratação, para seguir para o destino final, normalmente, aterros sanitários, ou reciclagem, pelo processo de compostagem.

2.1.3. Reator em batelada seqüencial (RBS)

Os processos que envolvem lodo ativado em batelada, mais conhecido como RBS (reator em batelada seqüencial), têm sido propostos como alternativa aos processos contínuos convencionais.

No reator batelada seqüencial, a biomassa encontra-se em suspensão, tal como ocorre no processo de lodos ativados, no entanto, todas as etapas do processo ocorrem em um único tanque, quais sejam, decantação primária, oxidação biológica e decantação secundária, onde reação e separação acontecem em diferentes momentos. Isto é conseguido por meio de ciclos de

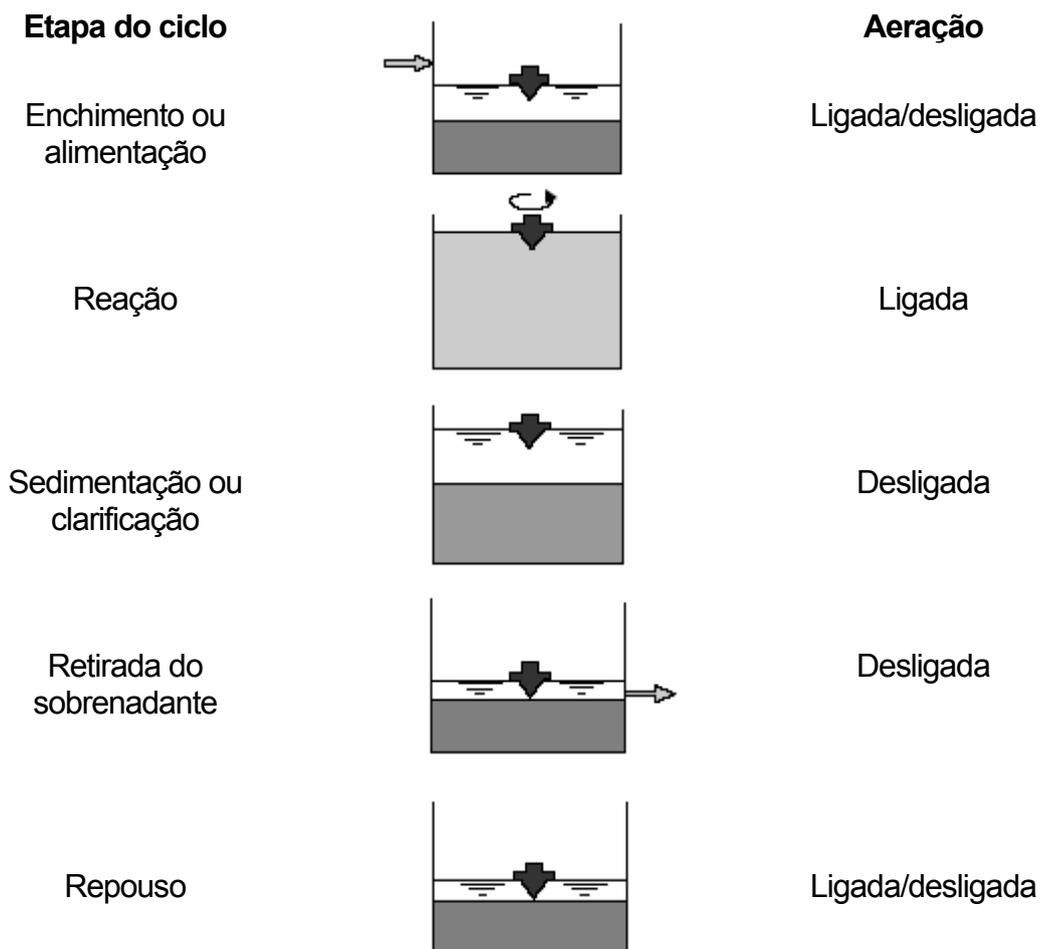
operação com durações definidas. Desse modo, o RBS pode ser encarado como um processo periódico, isto é, as condições do meio variam com o tempo.

Os reatores seqüenciais em batelada são operados em regime de ciclos. Cada ciclo é composto por cinco etapas distintas, que estão descritas no Quadro 2.1 e ilustradas na Figura 2.2.

Quadro 2.1 – Etapas do ciclo de operação de um reator intermitente

Etapas	Descrição
Enchimento ou alimentação	<ul style="list-style-type: none"> - A operação de enchimento consiste da adição do efluente contendo o substrato para a atividade microbiana. - Nesta etapa, a operação está sujeita a vários modos de controle denominados enchimento estático, enchimento com mistura e enchimento com reação (aerado). - O enchimento estático envolve a introdução de efluente sem mistura ou aeração. Este tipo de enchimento é mais comum em estações que objetivam a remoção de nutrientes. Tanto a mistura quanto a aeração são efetuadas no estágio de enchimento com reação.
Reação	<ul style="list-style-type: none"> - O objetivo deste estágio é completar as reações iniciadas durante o enchimento. - A etapa de aeração pode compreender mistura, aeração, ou ambos.
Sedimentação ou clarificação	<ul style="list-style-type: none"> - A separação da biomassa do efluente tratado ocorre durante a fase de sedimentação, análoga à operação de um decantador secundário em um sistema convencional. - A sedimentação em um sistema intermitente pode ter uma eficiência superior a de um decantador de fluxo contínuo, devido ao maior repouso do líquido em um tanque de batelada, sem interferência de entrada e saída de líquidos.
Retirada do sobrenadante	<ul style="list-style-type: none"> - O efluente clarificado é retirado durante a fase de esvaziamento. Feito isso, a biomassa permanece em repouso até que um novo ciclo se reinicie.
Repouso	<ul style="list-style-type: none"> - A fase final é denominada de repouso e é utilizada apenas em aplicações com vários tanques. - O descarte do lodo acontece tipicamente nesta fase.

Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2001).



Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2001).

Figura 2.2 – Ciclos do processo de operação intermitente.

2.2. Microbiologia

Os organismos mais importantes que participam do processo de lodos ativados são as bactérias, por serem responsáveis pela decomposição da matéria orgânica afluente. As bactérias usam a matéria orgânica para obter a energia necessária para o crescimento e a manutenção da massa celular. Uma fração do material orgânico é oxidada em produtos de baixa energia (NO_3^- , CO_2 e SO_4^{2-}), enquanto uma outra fração é sintetizada como material celular (METCALF e EDDY, 2003).

Enquanto, na comunidade de microrganismos no lodo ativado, predominam bactérias aeróbias que requerem compostos orgânicos e energia (bactérias heterotróficas), existem também populações de fungos e protozoários. Bactérias

nitrificantes, que têm a habilidade de utilizar compostos inorgânicos para o crescimento celular (bactérias litoautotróficas) estão presentes em quantidades variadas, dependendo do modo de operação e da quantidade de carbono e nitrogênio presentes.

Rotíferos e nematóides são mais frequentemente encontrados em sistemas com longos períodos de aeração ou com idades do lodo superiores a dez dias (WEF, 1996, citado por CAMPOS, 2002).

Entre os microrganismos encontrados em lodos ativados, algumas espécies são consideradas indicadoras das condições de depuração do sistema de tratamento.

Exames microscópicos regulares do lodo servem para indicar ao operador as tendências do processo, associadas à eficiência de remoção de matéria orgânica e da sedimentabilidade do lodo, adequação da aeração empregada, eventual presença de compostos tóxicos e ocorrência de sobrecargas orgânicas.

Esses indicadores servem, então, para sugerir a realização de medidas físico-químicas ou mudança na operação do sistema de tratamento, de tal forma que sejam mantidos os desempenhos desejados para cada unidade de tratamento (VAZOLLER, 1999).

O Quadro 2.2 apresenta a correlação entre ocorrência ou predominância de certos microrganismos com a característica do processo biológico.

Quadro 2.2 – Microrganismos indicadores das condições de depuração

Microrganismos	Característica do Processo
Predominância de flagelados e rizópodes	Lodo jovem, característico de início de operação ou idade do lodo (θ_c) baixa
Predominância de flagelados	Deficiência de aeração, má depuração e sobrecarga orgânica
Predominância de ciliados pedunculares e livres	Boas condições de depuração
Presença de <i>Arcella</i> (rizópode com teca)	Boa depuração
Presença de <i>Aspidisca costata</i> (ciliado livre)	Nitrificação
Presença de <i>Trachelophyllum</i> (ciliado livre)	θ_c elevada
Presença de <i>Vorticella microstoma</i> (ciliado peduncular) e baixa concentração de ciliados livres	Efluente de má qualidade
Presença de anelídeos do gênero <i>Aelosoma</i> (ciliado livre)	Excesso de oxigênio dissolvido
Predominância de filamentos	Intumescimento do lodo ou “ <i>bulking</i> ” filamentoso*

Fonte: VAZOLLER (1999).

* Para caracterizar o intumescimento é necessário avaliar os flocos biológicos.

2.3. A formação do floco e o intumescimento do lodo

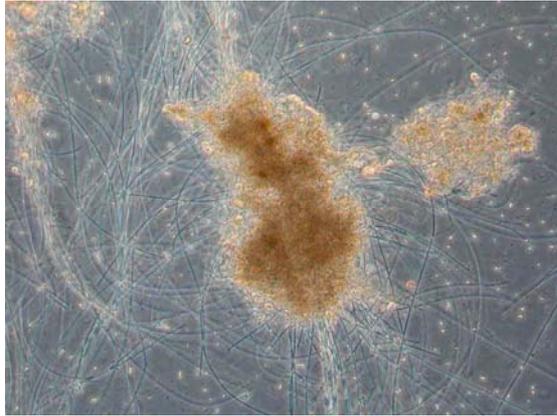
O floco biológico é uma estrutura heterogênea, composta por microrganismos e material orgânico diverso. Além das bactérias e dos protozoários, fungos, rotíferos, nematóides e, mais raramente, larvas de insetos, também são encontrados, aglomerados nos flocos. Contudo, as condições que levam ao crescimento aglomerado dos microrganismos ainda não estão bem esclarecidas (VON SPERLING, 1996). O que se sabe é que as bactérias filamentosas funcionam como uma espécie de esqueleto estrutural, ao qual as bactérias formadoras de floco se aderem, provavelmente por meio de exopolissacarídeos, presentes na forma de cápsula ou camada gelatinosa (VON SPERLING, 1996).

O floco biológico é formado por duas estruturas básicas, a saber: microestrutura, que é composta por bactérias formadoras de flocos e macroestrutura, constituída por microrganismos filamentosos. Estes microrganismos formam uma cadeia, uma espécie de rede, que serve de estrutura de apoio para o crescimento dos organismos formadores de flocos. As bactérias filamentosas, que formam a macroestrutura são responsáveis pelo formato dos flocos, uma vez que o floco cresce na direção que as bactérias filamentosas se desenvolvem (JENKINS *et al.*, 2003).

O crescimento de microrganismos com filamentos longos e fortes permite a formação de flocos macroscópicos que se mantêm intactos, mesmo em ambientes com fortes turbulências. Entretanto, quando os microrganismos filamentosos crescem em excesso, a sedimentabilidade do lodo diminui por causa de dois fatores: primeiro porque o floco fica menos denso, a estrutura do floco fica difusa e segundo, porque a aproximação de um floco ao outro é dificultada devido aos filamentos existentes entre os flocos, servindo como barreiras (SOUZA, 2002).

Quando o lodo apresenta esse excesso de microrganismos filamentosos em sua estrutura, ele é denominado de “*bulking* filamentoso” ou lodo intumescido (Figura 2.3), que, de acordo com JENKINS *et al.* (2003), é devido ao crescimento desbalanceado das bactérias filamentosas em relação às não filamentosas. Aquelas, presentes em alta concentração, produzem um floco com uma estrutura aberta e difusa (BITTON, 1994; VAN HAANDEL e MARAIS, 1999; GRADY *et al.*, 1999; JENKINS *et al.*, 2003).

Quando há o crescimento excessivo das bactérias filamentosas e o lodo torna-se intumescido, com pouca densidade, ao invés de decantar, ele flota no decantador secundário, ocasionado o que se chama de flotação por intumescimento filamentoso.



Fonte: SOUZA (2007).

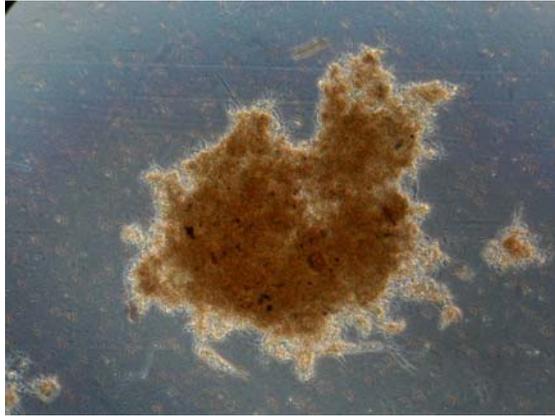
Figura 2.3 – Microfotografia de contraste de fase do floco filamentososo ou “*bulking filamentososo*” (100x).

Por outro lado é possível que o crescimento de microrganismos filamentosos seja insuficiente, neste caso, a estrutura do floco é fraca, desintegrando facilmente com a turbulência do tanque, formando o que se chama de “*pin-point flocc*” ou floco cabeça de alfinete (Figura 2.4), que sedimentam muito lentamente, produzindo um efluente turvo. O ideal é que haja um balanço entre os crescimentos dos microrganismos filamentosos e os formadores de flocos (Figura 2.5), formando flocos fortes, compactos e com boa sedimentabilidade, (HAANDEL e MARAIS, 1999).



Fonte: SOUZA (2007).

Figura 2.4 – Microfotografia de contraste de fase do floco cabeça de alfinete ou “*pin-point flocc*” (100x).



Fonte: SOUZA (2007).

Figura 2.5 – Microfotografia de contraste de fase do floco ideal (100x).

EIKELBOOM e VAN BUIJSEN (1981) citados por VAN HAANDEL e MARAIS (1999), desenvolveram um trabalho simultâneo de identificação dos microrganismos e obtiveram dados experimentais quanto às condições que estimulam o crescimento excessivo desses, o que possibilitou correlacionar o surgimento de certos tipos de microrganismos filamentosos com as condições operacionais do sistema ou as condições do efluente. Estes estudos mostraram que, no máximo, dez tipos de bactérias filamentosas são responsáveis por mais de 90% dos problemas relacionados à má decantabilidade do lodo nas estações de tratamento de efluentes por lodos ativados.

Segundo JENKINS *et al.* (2003), existem fatores específicos que influenciam no surgimento dos microrganismos filamentosos, que são: concentração de oxigênio dissolvido; deficiência nas concentrações de nutrientes como N e P; baixo pH e septicidade do efluente, apresentando concentrações de sulfetos, ácidos orgânicos, e natureza orgânica do substrato, como substâncias facilmente biodegradáveis e outros.

O Quadro 2.3 mostra as condições que favorecem o surgimento do lodo filamentoso e o tipo de bactéria que predomina em tais condições.

Quadro 2.3 – Tipo de lodo filamentoso e indicadores das condições operacionais e do efluente que causam o intumescimento

Causa	Tipo de microrganismo filamentoso
Oxigênio dissolvido (OD) baixo	Tipo 1701, <i>Sphaerotilus natans</i> , <i>Haliscomenobacter hydrossis</i>
Esgoto séptico/S ⁻² e ácidos orgânicos de cadeia curta, como ácido acético	<i>Thiotrix sp.</i> ; <i>Beggiatoa</i> e Tipo 021N
Deficiência de N e P	<i>Thiotrix sp.</i> ; <i>Sphaerotilus natans</i> , Tipo 021N; <i>Haliscomenobacter hydrossis</i> ; Tipo 0041 e Tipo 0675
pH baixo	Fungos
A/A (Anóxico/aeróbio)	<i>Microtrix parvicella</i> , <i>Haliscomenobacter hydrossis</i> ; <i>Nocardia sp.</i> ; Tipo 021N, Tipo 0042, Tipo 0675; Tipo 0092, Tipo 0581, Tipo 0961 e Tipo 0803

Fonte: adaptado de SPERLING (1997), HAANDEL e MARAIS (1999) e JENKINS (2003).

2.4. Índice volumétrico do lodo

Há uma correlação direta da sedimentabilidade do lodo no decantador secundário com o intumescimento filamentoso (PAL *et al.* 1980). O índice volumétrico do lodo (IVL) é importante para avaliar, no laboratório, o comportamento de sedimentabilidade do lodo na unidade de decantação secundária.

O IVL é um ensaio empírico de sedimentabilidade bastante usual no controle de estações de tratamento. O índice é definido como o volume ocupado por 1g de lodo após a sedimentação por trinta minutos.

O método consiste em colocar uma amostra de lodo, devidamente homogeneizada e com concentração de sólidos conhecida, em uma proveta graduada e, após 30 minutos, anotar a altura da interface de sedimentação do lodo e calcular o volume ocupado por cada grama deste material (Equação 2.1).

$$IVL = \frac{H_{30} \cdot 10^6}{H_0 \cdot SSTA}, \quad (2.1)$$

onde:

IVL = índice volumétrico do lodo, ml.g^{-1}

H_{30} = altura da coluna de lodo após trinta minutos

10^6 = conversão de mg para g e de l para ml

H_0 = altura da coluna de lodo no tempo “zero minuto”

SSTTA = sólidos suspensos totais no tanque de aeração (mg.l^{-1})

Menores valores de IVL indicam maior decantabilidade no decantador secundário, reduzindo, deste modo, o arraste de sólidos no efluente tratado, melhorando sua qualidade.

De acordo com VON SPERLING (1997), o teste tradicional do IVL sofre a limitação da concentração inicial de sólidos no lodo (denominador da Equação 2.1), pois, para uma mesma altura de sedimentação após 30 minutos, um lodo que apresenta baixa concentração de sólidos terá um valor de IVL superior a outro lodo com elevada concentração de sólidos.

Uma forma de minimizar essa interferência é realizar o teste em concentração de sólidos padronizada. A concentração selecionada é $3,5 \text{ g.l}^{-1}$, por apresentar uma concentração usual dos valores de sólidos nos tanques de aeração do processo de lodos ativados. Efetua-se o teste para diferentes valores de sólidos (diluição) e interpola-se o resultado para valores de $3,5 \text{ g.l}^{-1}$ (VON SPERLING, 1997).

Existem diferentes faixas para valores de IVL para verificar o comportamento de sedimentabilidade do lodo. VON SPERLING (1997) faz uma interpretação aproximada dos resultados do IVL e classifica-os de acordo com as faixas de valores apresentadas no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Interpretação aproximada do índice volumétrico do lodo IVL

Sedimentabilidade	IVL (ml.g⁻¹)
Ótima	0 – 50
Boa	50 – 100
Média	100 – 200
Ruim	200 – 300
Péssima	> 300

Fonte: VON SPERLING (1997).

2.5. Uso substâncias que aumentam a sedimentabilidade do lodo

Quando há problemas na separação da fase sólida (lodo) da fase líquida (efluente) no decantador secundário, causados pelo intumescimento do lodo, deve-se buscar medidas para solucioná-los.

De acordo com JENKINS et al. (2003) e VAN HAANDEL e MARAIS (1999), o primeiro passo consiste em observar o lodo no microscópio e identificar o microrganismo filamentosamente dominante, que está causando o intumescimento do lodo. Feito isto, deve-se relacionar seu surgimento às possíveis causas, procurando, então, corrigi-las.

VAN HAANDEL e MARAIS (1999) reportam que, se as causas forem complexas, não permitindo uma retificação imediata, pode-se adotar as seguintes providências:

- Manipular a recirculação do lodo;
- Modificar os pontos de introdução do efluente no reator;
- Utilizar substâncias que aumentem a sedimentabilidade do lodo, como polieletrólitos e polímeros;
- Usar substâncias tóxicas para eliminação seletiva dos microrganismos filamentosos.

O uso de substâncias para aumentar a decantabilidade do lodo se restringe a dois tipos: agentes floculantes e agentes coagulantes (polieletrólitos e coagulantes) e agentes lastrantes (talco).

Os polieletrólitos podem ser usados para aumentar a densidade dos flocos, de forma a reduzir os efeitos das barreiras dos filamentos entre dois flocos e também internamente nos flocos. Para isto, são necessários testes de bancadas para determinar o tipo e a dosagem ideal destes polieletrólitos a serem aplicados no lodo, de forma a não piorar a decantabilidade. Geralmente, eles são adicionados no final do reator biológico, antes de entrar no decantador secundário.

Coagulantes como sulfato de alumínio e cloreto férrico têm sido usados para aumentar a velocidade de sedimentação do lodo filamentoso. A adição destas substâncias tende a aumentar a produção de lodo significativamente (HAANDEL e MARAIS, 1999).

A adição de agentes que aumentam a densidade do floco, como talcos, no controle “*bulking*” filamentoso tem sido estudada por alguns autores (GRAJA *et al.*, 1998; PIIRTOLA, *et al.*, 1999(a); PIIRTOLA, *et al.*, 1999(b); SEKA, *et al.*, 2000; AGRIDIOTIS, *et al.*, 2006). A função do talco no reator biológico em um tratamento de efluentes por lodos ativados é aumentar a densidade e o tamanho do floco biológico, melhorando a sedimentação do lodo na unidade de decantação.

O mecanismo de ação do talco é a agregação ao floco biológico, fortalecendo sua estrutura e aumentando o seu peso, de modo a facilitar a sedimentação, caracterizando-se, assim, como um agente lastrante. Com isso, há uma queda nos valores de IVL dos tratamentos em que o talco está presente.

De acordo com GRAJA *et al.* (1998), BIDAULT *et al.* (1996) e CLAUSS *et al.* (1999), essa agregação hidrofóbica das partículas de talco junto ao floco biológico se deve à presença de exopolissacarídeos (EPS) dentro da matriz do floco biológico. Os EPS são compostos por várias substâncias, como proteínas, ácidos nucleicos e lipídeos, possuindo características hidrofóbicas.

BIDAULT *et al.* (1997) constataram que o talco modificou estruturalmente a floculação, sobretudo devido ao seu peso, agindo de forma que os filamentos das bactérias foram atraídos e aderidos ao lodo devido à afinidade específica entre o talco e os EPS, contribuindo para a formação de flocos grandes e pesados.

Neste mesmo estudo, os autores verificaram que o talco é atraído para dentro da matriz do floco, sendo colonizado pelas bactérias e interagindo com a matriz extracelular, formando um biofilme, mecanismo de interação entre o floco e o talco chamado de “flocos nucleação”.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Visando verificar a influência do uso de talco para o controle do intumescimento filamentososo do lodo, foram montados, nas dependências do Laboratório de Celulose e Papel – Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais, cinco sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados do tipo reator em batelada seqüencial (RBS). Os experimentos foram conduzidos no período de dez de dezembro de 2006 a dois de março de 2007.

Para o cumprimento dos objetivos propostos, foram utilizados os materiais e métodos relatados a seguir.

3.1. Coleta, preservação e preparo dos efluentes

O efluente utilizado na alimentação dos reatores biológicos foi coletado na fábrica de papel reciclado da Klabin Papéis e Embalagens, em Ponte Nova, Minas Gerais.

Neste trabalho, foram utilizadas amostras do efluente final da máquina de papel reciclado, coletadas na canaleta de efluentes depois do tratamento primário e antes da entrada do tratamento biológico.

O volume necessário para experimento durante uma semana foi coletado e transportado imediatamente em bombonas de PVC de 50 l para Viçosa-MG, onde foram estocados e preservados sob refrigeração a 4°C. Foi realizada uma coleta

semanal de efluente, totalizando 12 coletas durante o período de execução do experimento, no qual a fábrica operou normalmente.

Antes de ser tratado, o efluente foi passado por uma peneira de 150 *mesh* para a remoção de fibras e plásticos remanescentes.

3.1.1. Coleta do lodo biológico

O lodo biológico utilizado neste estudo foi obtido na estação de tratamento de efluentes (ETE), do sistema de lodos ativados, da fábrica na qual foram coletadas as amostras de efluentes. O material foi coletado na linha de recirculação de sólidos, onde a concentração da biomassa é mais alta. Após a coleta, o lodo foi armazenado em bombonas de PVC de 5 l e, imediatamente, transportado para Viçosa-MG, onde foi mantido sob aeração e alimentado com o efluente proveniente da indústria.

3.2. Caracterização físico-química dos efluentes

Para caracterização físico-química dos efluentes, foram feitas análises de pH, condutividade elétrica (CE), demanda química de oxigênio (DQO) total e solúvel, demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅) total e solúvel, cor, sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), cloretos, dureza total, nitrogênio total (N_{total}) e fósforo total (P_{total}). As técnicas empregadas para as análises físico-químicas dos efluentes seguiram os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

As análises da caracterização físico-química dos efluentes, quanto aos parâmetros de DQO e DBO denominadas “total”, referem-se à amostra bruta, ou seja, *in natura*, já as análises “solúvel” dos mesmos são correspondentes à amostra filtrada em membranas de fibra de vidro com diâmetro dos poros de 1,2 µm.

No Quadro 3.1, encontram-se os valores médios das características físico-químicas do efluente durante a execução do experimento. As análises foram realizadas com três determinações, incluindo-se, ainda, um branco de reagentes, para avaliar possíveis contaminações.

Quadro 3.1 - Caracterização físico-química do efluente durante a execução do experimento

Parâmetros	Unidade	n	Valores	
DQO _{total}	mg.l ⁻¹	60	3.065 ± 427	
DQO _{solúvel}		60	2.427 ± 363	
DBO _{5 total}		12	2.892 ± 183	
DBO _{5 solúvel}		12	2.476 ± 123	
Cor		12	264 ± 21	
Cloretos		12	95 ± 11	
Dureza _{total}		12	776 ± 24	
N _{total}		12	0,70 ± 0,05	
P _{total}		12	1,41 ± 0,03	
ST		12	182 ± 70	
SST		12	1.522 ± 324	
SDT		12	64 ± 25	
pH		-	60	5,4 ± 1,7
CE		mS.cm ⁻¹	60	2,4 ± 0,26

n = número de amostras

± = desvio padrão

3.3. Caracterização físico-química dos talcos

Os talcos utilizados neste experimento foram obtidos da empresa Xilolite S/A. São compostos por silicato de magnésio hidratado ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), produzido a partir de minério extraído de jazidas em Brumado-BA e beneficiado em moinhos de rolos ou vertical tipo *raymond*. Apresentam-se na forma de pó branco, muito fino, untuoso ao tato, inodoro e isento de asbestos. Encontra-se no Quadro 3.2 a composição química dos talcos estudados.

No Quadro 3.3, são apresentadas as características dos cinco talcos utilizados neste experimento, sendo estes denominados: OD10, OD42, OD325, TB10 e TB325.

Quadro 3.2 – Composição química dos talcos

Análise química	Composição (%)
MgO	31,0
SiO ₂	60,1
CaO	0,2
Fe ₂ O ₃	0,3
Al ₂ O ₃	1,4
Perda ao fogo (1.000° C)	7,0

Fonte: XILOLITE S/A (2006).

Quadro 3.3 – Características físico-químicas dos talcos

Características físico-químicas	Talcos				
	OD 10	OD 42	OD 325	TB 10	TB 325
pH (solução 10%)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Umidade (% máxima)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Absorção de óleo (%)	66	65	51	81	54
Densidade aparente (g.cm ⁻³)	0,41	0,18	0,90	0,50	0,40
Densidade compactada (g.cm ⁻³)	1,30	0,55	1,60	0,54	0,95
Área específica (cm ² .g ⁻¹)	27.000	15.000	9.000	26.000	17.000
Alvura (mín %)	90	91	94	89	88
Tamanho de partícula (<i>mesh</i>)	#100	#200	#325	#400	#325

Fonte: XILOLITE S/A (2006).

3.4. Estratégia Experimental

3.4.1. FASE PRELIMINAR

3.4.1.1. Identificação da bactéria causadora do intumescimento filamentoso

As amostras de lodo foram analisadas em microscópio de luz direta e contraste de fase nos aumentos de 100, 200 e 400 vezes. Foram feitas análises do lodo fresco e do talco misturado em água destilada.

A identificação dos microrganismos foi realizada com observações microscópicas do lodo e, de acordo com a chave dicotômica para determinação da espécie disponível em JENKINS *et al.* (2003). A técnica permite observar a forma dos filamentos e das células, bem como a relação destes com os flocos e as medidas de diâmetro e comprimento das células e filamentos.

Lâminas com preparações fixadas de amostras de lodo foram submetidas à coloração de Gram, coloração de Neisser (grânulos de polifosfatos), coloração de PHB e observadas em aumento de 1.000 vezes em microscopia de luz direta. Lâminas com preparações frescas foram submetidas a observações em 1.000 vezes de aumento em contraste de fase para determinação do teste de oxidação do sulfeto (grânulos de enxofre) e identificação da bainha nos filamentos. Esta metodologia está de acordo com a desenvolvida por EIKELBOOM (1981), citado por JENKINS *et al.* (2003).

A concentração de microrganismos filamentosos foi estimada visualmente (Figura 3.1), conforme JENKINS *et al.* (2003).

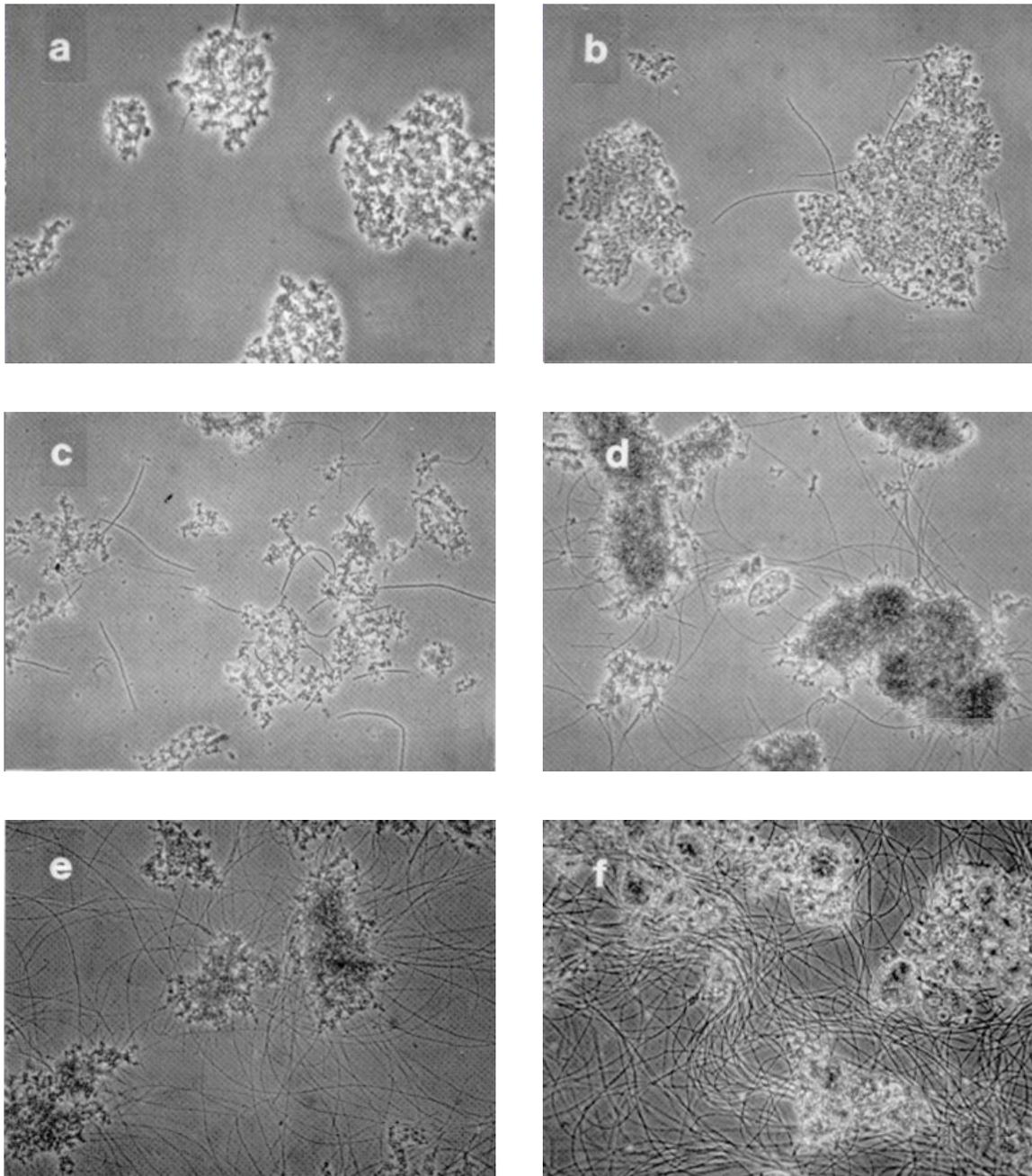


Figura 3.1 – Microfotografias de contraste de fase (100x) da concentração de microrganismos filamentosos do método de contagem subjetiva proposta por JENKINS *et al.* (2003): **(a)** Filamentos presentes ocasionalmente em alguns flocos; **(b)** Filamentos comumente observados, porém não presentes em todos flocos; **(c)** Filamentos em todos os flocos, porém em baixa concentração; **(d)** Filamentos observados em todos os flocos em média concentração; **(e)** Filamentos observados em todos os flocos em alta concentração e **(f)** Filamentos observados em todos os flocos em excessiva concentração.

3.4.1.2. Seleção do melhor talco

Foi necessário um estudo preliminar com o objetivo de verificar a viabilidade técnica do uso de talco para controle do intumescimento filamentosos do lodo e determinar o melhor tipo de talco e sua dosagem ótima para este fim. Nesta etapa, foram realizados testes preliminares para seleção do melhor talco entre os disponíveis da Xilolite S/A.

No tratamento preliminar, a concentração de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA) foi mensurada e diluída em efluente da própria máquina de papel reciclado para uma concentração inicial de 4.500 mg.l^{-1} , valor este que encontra-se dentro do limite máximo de SSTTA de $4.500 - 5.000 \text{ mg.l}^{-1}$ recomendados pela literatura (METCALF e EDDY, 2003). Foram feitos tratamentos com três diferentes concentrações de talco (50%, 75% e 100% em relação ao SSTTA) para cada tipo de talco e mais um teste sem talco, configurando como teste controle. Utilizou-se um volume de 200 ml de lodo biológico para dois tempos de mistura (cinco e 16 horas).

A reação da mistura (lodo e talco) foi realizada em agitadores de plataforma a 200 rpm, em temperatura ambiente. No Quadro 3.4, encontram-se representados os tratamentos utilizados neste estudo preliminar.

Quadro 3.4 – Tratamento preliminar e relação talco/SSTTA

Tratamento Preliminar	talco/SSTTA
TP1	0%
TP2	50%
TP3	75%
TP4	100%

Como critério de seleção do melhor tipo de talco e de suas dosagens ótimas, foi avaliado o índice volumétrico do lodo (IVL) nos tempos de reação de cinco e 16 horas de mistura.

3.4.2. Determinação das melhores dosagens de talco e sua influência no sistema de tratamento biológico

Nesta etapa foram feitos testes com o talco que apresentou a melhor capacidade de redução do IVL, buscando verificar sua influência nos sistemas de tratamento biológico e determinar a melhor dosagem de talco capaz de aumentar significativamente a sedimentabilidade do lodo.

Houve testes com o talco em cinco concentrações diferentes em relação aos SSTTA. No Quadro 3.5, encontram-se representados os tratamentos utilizados nesta etapa.

Quadro 3.5 – Tratamentos realizados com o talco que apresentou melhor redução de IVL

Tratamentos	talco/SSTTA
T1	0%
T2	25%
T3	50%
T4	75%
T5	100%

Como estratégia experimental para avaliar o efeito do talco no sistema de tratamento biológico, foram realizados os testes em duas fases distintas e seqüenciais.

3.4.2.1. FASE 1: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção da θ_c constante

Na Fase 1, avaliou-se o efeito de adições sucessivas de talco sobre o sistema de tratamento, com controle de sólidos por meio da manutenção da idade do lodo (θ_c) de dez dias, sem, contudo, preocupar com a concentração de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA). Nesta fase, foram realizadas três aplicações sucessivas de talco.

3.4.2.2. FASE 2: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante

Na Fase 2, o talco foi adicionado aos reatores, sendo que, um ciclo de tratamento biológico após sua aplicação, havia redução das concentrações de SSTTA em todos eles entre 4.500 – 5.000 mg.l⁻¹, faixa de valores de concentrações máximas de sólidos recomendadas pela literatura (METCALF e EDDY, 2003). Nesta fase, foram realizadas duas aplicações sucessivas de talco.

A seguir, são relatados os materiais e métodos utilizados nestas duas fases do experimento.

3.5. Reatores em Batelada Seqüencial (RBS)

O tratamento biológico laboratorial constituiu de um sistema de lodos ativados. Adotou-se um processo de alimentação intermitente, ou seja, reatores em batelada seqüencial (RBS), mantendo o tempo de retenção hidráulica compatível com o sistema convencional dos lodos ativados.

Os biorreatores foram constituídos de cinco frascos de PVC de 3.000 ml, com um volume útil de 2.000 ml, equipados com difusores de ar, que foram suficientes para a agitação mecânica e para o suprimento de oxigênio necessário ao tratamento aeróbio dos efluentes. Os biorreatores foram mantidos numa temperatura controlada (35°C), utilizando um sistema de termostato e aquecedores semelhantes ao utilizado em aquários. Foram utilizados cinco biorreatores, sendo um para o tratamento sem a adição de talco (controle) e os outros quatro para os tratamentos, nos quais foi utilizado o talco para o controle do *bulking* filamentoso.

Nas Figuras 3.2 e 3.3, estão representados o esquema laboratorial e os biorreatores utilizados neste estudo, respectivamente.

O tempo de cada ciclo de tratamento adotado foi de 24 horas, sendo 21 horas de enchimento/reação e três horas de sedimentação/repouso. A idade do lodo foi mantida em dez dias, sendo o descarte do lodo efetuado no próprio reator, e, o oxigênio dissolvido (OD), mantido acima de 2,0 mg.l⁻¹. O pH do efluente de entrada foi ajustado na faixa da neutralidade (6,8 – 7,2) e a relação alimento/microrganismo (A/M) mantida entre 0,2 e 0,3 kgDBO₅.kgSSV.dia⁻¹.

O inóculo utilizado foi o lodo aeróbio da ETE da mesma indústria onde foram coletados os efluentes. A eficiência dos tratamentos e a sedimentabilidade do lodo foram monitoradas por meio da remoção de DQO dos efluentes e do IVL, respectivamente.

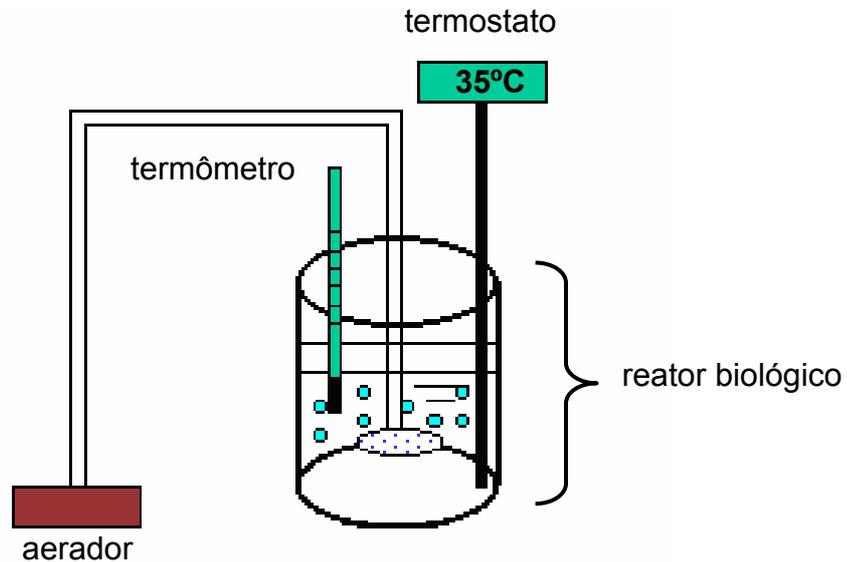


Figura 3.2 – Esquema laboratorial do RBS utilizado no experimento.



Figura 3.3 – Reatores em batelada seqüencial (RBS) do experimento.

3.6. Ajuste do lodo biológico

Antes de iniciar o tratamento biológico, foi realizado um ajuste do lodo ao efluente a ser tratado. Foram realizadas análises microscópicas do lodo biológico, por meio das quais se verificou grande quantidade de bactérias filamentosas, causando uma má sedimentabilidade do lodo. Em virtude da dificuldade de separar o lodo do efluente tratado sem perder significativas quantidades daquele, optou-se por fazer adições crescentes de efluente ao mesmo, como o intuito de obter uma relação entre volume de efluente decantado e de lodo, que causasse pouco arraste de sólidos. No Quadro 3.6, encontra-se a evolução dos volumes de efluente e lodo na fase de adaptação.

No sistema em batelada, cada ciclo corresponde a um tratamento completo, de modo que esta etapa de adaptação foi realizada em dez dias.

Quadro 3.6 - Volumes de efluente e lodo durante a fase de adaptação do lodo

Volume	Ciclo (dias)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Efluente (ml)	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Lodo (ml)	1.650	1.600	1.550	1.500	1.450	1.400	1.350	1.300	1.250	1.200

A avaliação da adaptação do lodo foi realizada com acompanhamento da remoção de DQO e a concentração de biomassa, por meio das análises de SSTTA e sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA).

3.7. Tratamento biológico de efluentes

Uma vez adaptado o inóculo, iniciou-se o tratamento biológico dos efluentes. Nos reatores foram adicionados 800 ml de efluente e 1.200 ml de lodo decantado. Foi feito o controle do pH do efluente de entrada do sistema, sendo sempre ajustado o valor até a neutralidade (6,8 – 7,2), utilizando-se solução de NaOH 1 mol.l⁻¹.

O efluente foi aerado e misturado por meio de difusores de ar, durante um período de 21 horas, correspondente à etapa de enchimento e reação. Os

tratamentos foram realizados à temperatura constante de 35°C, conforme normalmente ocorre em reatores de lodos ativados. Foi feito o controle de oxigênio dissolvido, de modo a assegurar uma concentração sempre acima de 2 mg.l⁻¹ no sistema.

Próximo à etapa final de cada ciclo, foram retiradas duas alíquotas de 100 ml em cada reator, contendo a mistura de lodo e efluente, com as quais eram realizadas as análises de SSTTA e SSVTA. Além disso, essas alíquotas corresponderam ao descarte do lodo biológico, com o objetivo de manter a idade do lodo de dez dias.

Após o período de reação, a mistura foi transferida para provetas de 2.000 ml, onde o lodo sedimentava por três horas. Este período correspondeu à etapa de repouso e sedimentação. No período de trinta minutos de repouso, eram feitas as leituras da altura da zona de sedimentação (H₃₀), necessárias para a análise do índice volumétrico do lodo (IVL).

Findando o período de sedimentação, o sobrenadante, ou seja, o efluente tratado foi separado da biomassa (lodo), por meio de sifonamento. Ele foi utilizado para a realização das análises de DQO, DBO₅, condutividade elétrica e turbidez. O lodo decantado, totalizando um volume de 1.200 ml, era novamente misturado com o efluente de entrada, de 800 ml, iniciando-se, assim, um novo ciclo de tratamento. Foram realizados, no total, 60 ciclos de tratamento, durante o período de execução do experimento.

Esporadicamente, foram realizadas análises microscópicas do lodo de cada reator.

Também como critérios de monitoramento e controle do sistema de tratamento, a relação alimento/microrganismo (A/M), isto é, a quantidade de substrato em relação à quantidade de biomassa, foi controlada, mantendo-se entre 0,2 e 0,3 kgDBO₅.kgSSV.dia⁻¹. Como fonte de nutrientes, foi adicionado no efluente de entrada nitrogênio na forma de uréia – (NH₂)₂CO – e fosfato monobásico de sódio – (NaH₂PO₄.H₂O) –, como fonte de fósforo, obedecendo à proporção de DBO:N:P igual a 100:5:1.

3.8. Procedimentos analíticos

As seguintes análises foram realizadas nos efluentes tratados: demanda química de oxigênio (DQO) total e solúvel, demanda bioquímica de oxigênio cinco dias (DBO_5), turbidez, condutividade elétrica e pH.

As análises realizadas no lodo/reator biológico foram: sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA), sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA), sólidos suspensos fixos no tanque de aeração (SSFTA), índice volumétrico do lodo (IVL), oxigênio dissolvido (OD), temperatura ($^{\circ}C$) e observações microscópicas.

As técnicas empregadas para as análises físico-químicas e biológicas dos efluentes e lodo/reator biológico seguiram os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).

3.9. Parâmetros operacionais dos RBS

Os parâmetros de controle operacionais dos reatores em batelada seqüencial (RBS) foram:

3.9.1. Concentração de biomassa no reator biológico

A análise de sólidos é importante no controle de processos de tratamento biológico de efluentes. A análise de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA) foi realizada por meio da medida dos sólidos retidos em um filtro de fibra de vidro com diâmetro dos poros de $1,2 \mu m$. Tal filtro foi previamente seco em estufa ($105^{\circ}C$) por uma hora e pesado. Após a filtração do lodo em um sistema a vácuo, o filtro contendo o lodo foi novamente seco e pesado e, por diferença de peso em relação ao volume da amostra, obtém-se os SSTTA's. A concentração de SSTTA foi calculada por meio da Equação 3.1.

$$SSTTA = \frac{(A - B) \cdot 10^3}{V_{amostra}}, \quad (3.1)$$

onde:

SSTTA = sólidos suspensos totais no tanque de aeração (mg.l^{-1})

A = peso do filtro + resíduo seco, antes da queima na mufla (g)

B = peso do filtro de fibra de vidro, após secagem em estufa (g)

10^3 = conversão de g para mg

V = volume da amostra (l)

Já os SSVTA foram obtidos por meio da calcinação a $550\text{ }^\circ\text{C}$ do resíduo obtido na análise de SSTTA. Obteve-se a concentração de SSVTA por meio da Equação 3.2.

$$\text{SSVTA} = \frac{(C - D) \cdot 10^3}{V_{\text{amostra}}}, \quad (3.2)$$

onde:

SSVTA = sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (mg.l^{-1})

C = peso do filtro + resíduo seco, antes da queima na mufla (g)

D = peso do filtro + resíduo seco, após a queima na mufla (g)

10^3 = conversão de g para mg

V = volume da amostra (l)

A fração volátil dos SSTTA, ou seja, os SSVTA representam a fração orgânica (biomassa). Apesar desse parâmetro não distinguir o material bioquimicamente ativo do material inerte do lodo, serve como base importante para a estimativa da concentração de microrganismos presentes nos reatores.

3.9.2. Índice volumétrico do lodo (IVL)

O IVL é um ensaio empírico de sedimentabilidade bastante usual no controle de estações de tratamento. O IVL é definido como o volume ocupado por 1g de lodo após a sedimentação por trinta minutos.

Para a determinação da sedimentabilidade do lodo, realizou-se a análise do IVL. O índice volumétrico do lodo foi determinado colocando-se em repouso, durante trinta minutos, um volume de, aproximadamente, 2.000 ml do lodo de

concentração de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA) conhecida, em uma proveta graduada de 2.000 ml. Após este período de repouso, procedia-se à leitura da altura da coluna de sedimentação (H_{30}) e, em seguida, calculava-se o IVL de acordo com a Equação 3.3. Na Figura 3.4, está ilustrado um esquema representativo da análise do IVL.

$$IVL = \frac{H_{30} \cdot 10^6}{H_0 \cdot SSTTA}, \quad (3.3)$$

onde:

IVL = índice volumétrico do lodo, ml.g^{-1}

H_{30} = altura da coluna de lodo após trinta minutos

10^6 = conversão de mg para g e de l para ml

H_0 = altura da coluna de lodo no tempo “zero minuto”

SSTTA = sólidos suspensos totais no tanque de aeração (mg.l^{-1})

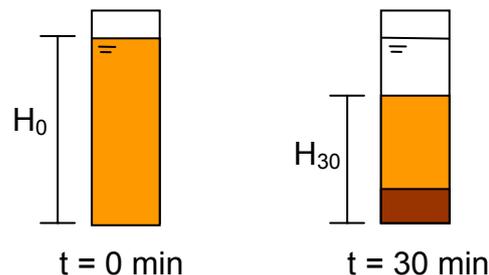


Figura 3.4 – Esquema representativo da análise do índice volumétrico do lodo.

A interpretação da sedimentabilidade do lodo foi realizado por meio de valores típicos propostos por VON SPERLING (1997) de IVL encontrados na Quadro 2.4. Quanto maior o valor de IVL, pior é a sedimentabilidade do lodo, ou seja, o lodo ocupa um maior volume no decantador secundário.

3.9.3. Idade do lodo (θ_c)

A idade do lodo ou tempo médio de residência celular representa a relação entre a massa de sólidos no sistema e a massa de sólidos retirada (descartada)

do sistema por unidade de tempo. A idade do lodo é determinada por meio das análises das concentrações de SSTTA do reator biológico.

Durante a execução do experimento, o descarte do lodo foi realizado no reator biológico. Os cálculos para a determinação da idade do lodo foram efetuados de acordo com a Equação 3.4.

$$\theta_c = \frac{V_{ta} \cdot X_{ta}}{Q_d \cdot X_d + (Q_a - Q_d) \cdot X_e}, \quad (3.4)$$

onde:

θ_c = idade do lodo (dias)

V_{ta} = volume do tanque de aeração (m^3)

X_{ta} = sólidos suspensos totais no tanque de aeração ($kg \cdot m^{-3}$)

Q_d = vazão de descarte do lodo ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

X_d = concentração de sólidos no lodo de descarte ($kg \cdot m^{-3}$)

Q_a = vazão afluyente ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

X_e = concentração de sólidos no efluente tratado ($kg \cdot m^{-3}$)

3.9.4. Relação A/M

A relação alimento/microrganismo (A/M), representa a relação entre a quantidade de substrato disponível por unidade de massa de biomassa.

A relação A/M foi determinada por meio das análises de DQO e DBO do efluente de entrada, das concentrações de SSTA no reator e da vazão de entrada do efluente nos reatores biológicos. Os cálculos para a determinação da relação alimento/microrganismos foram efetuados utilizando a Equação 3.5.

Para os cálculos da A/M utilizaram-se valores de DBO_5 , transformando os valores de DQO em DBO_5 , por meio da relação DBO_5/DQO .

$$A/M = \frac{Q_a \cdot DBO_a}{V_{ta} \cdot X_{ta}}, \quad (3.5)$$

onde,

A/M = taxa alimento/microrganismo (kg DBO₅.kg SSV.dia⁻¹)

DBO_a = demanda bioquímica de oxigênio do afluente (kg.m⁻³)

V_{ta} = volume do tanque de aeração (m³)

V_a = vazão afluente (m³.dia⁻¹)

X_{ta} = sólidos suspensos totais no tanque de aeração (kg.m⁻³)

Q_a = vazão afluente (m³.dia⁻¹)

3.9.5. Eficiência do tratamento biológico

A eficiência do tratamento biológico foi realizada por meio da taxa de remoção de DQO, sendo determinada pelos valores de DQO total de entrada e DQO solúvel de saída das unidades de tratamento. Os cálculos para a determinação de remoção de DQO foram efetuados de acordo com a Equação 3.6.

$$\%DQO = \frac{(DQO_a - DQO_e)}{DQO_a} \cdot 100, \quad (3.6)$$

onde,

% DQO = remoção de DQO

DQO_a = demanda química de oxigênio total do afluente (kg.m⁻³)

DQO_e = demanda química de oxigênio solúvel do efluente tratado (kg.m⁻³)

3.10. Programa de amostragem e métodos analíticos

O programa de amostragem e as análises físico-químicas e biológicas realizadas durante a execução do experimento são apresentadas no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Programa analítico e de amostragem

Análises	Unidades	Amostragem			Periodicidade	
		Efluente de entrada	Reator biológico	Efluente tratado		
DQO solúvel	mg.l ⁻¹	X			diária	
DQO total				X	diária	
SST		X	X	X	diária	
SSF				X	diária	
SSV				X	diária	
OD				X	dois em dois dias	
IVL		ml.g ⁻¹		X	diária	
pH		-	X		X	diária
Turbidez		UNT			X	diária
Condutividade Elétrica		mS.cm ⁻¹			X	diária
Observações Microscópica	-		X		três em três dias	

Todos os reagentes utilizados nas análises foram de grau padrão analítico ou equivalente. As análises foram realizadas com três determinações, incluindo-se ainda um branco de reagentes, para avaliar possíveis contaminações.

3.11. Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados nas análises de caracterização físico-química e biológica dos efluentes e lodo biológico e no monitoramento e controle do sistema de tratamento encontram-se descritos no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Equipamentos utilizados

Instrumento	Marca	Modelo
Balança analítica	BELMARK	210A
Bomba de vácuo	Marconi	MA 057/3
Espectrofotômetro UV/VIS	HACH	DR 2800
Estufa	Nova Ética	400-D (200°C)
Incubadora de DBO	WTW	TS 606/3
Medidor de oxigênio dissolvido	WTW	Oxi 315i
Turbidímetro	DIGIMED	DM-C2
Condutivímetro	DIGIMED	DM-3
Medidor de pH	DIGIMED	DM-10
Mufla	Fornitec	F1DM
Termorreator de DQO	HACH	DBR 200

3.12. Análises estatísticas

O experimento foi montado num esquema de parcelas subdivididas, tendo, nas parcelas, as aplicações de talco e, nas subparcelas, os cinco tratamentos com diferentes concentrações de talco, avaliando-se as diferenças quando ao IVL e a eficiência de remoção de DQO, obedecendo um delineamento experimental inteiramente casualizado com três repetições.

Os dados foram interpretados por meio de análises de regressão e de variância.

Na análise de regressão, os dados foram ajustados em função do IVL em relação ao tempo, em cada um dos cinco tratamentos. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão (utilizando-se o teste “t” com nível de significância de 5%) e no valor do coeficiente de determinação (R^2). Foram feitas análises de identidade de modelo utilizando-se o intervalo de confiança, com o objetivo de comparar a semelhança ou não do comportamento de cada curva de regressão.

A análise de variância foi aplicada com o objetivo de avaliar a variabilidade e de comparar as médias de IVL e de eficiência de remoção de DQO em cada um

dos cinco tratamentos. As médias dos tratamentos foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram feitas utilizando-se os *softwares* SAEG 5.0 (FUNARBE, 1993; RIBEIRO JUNIOR, 2001) e SAS (SCHOLOTZHAUER e LITTELL, 1997).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. FASE PRELIMINAR

4.1.1. Análise do floco biológico e identificação dos microrganismos causadores do intumescimento do lodo

O lodo utilizado durante o experimento obtido de um sistema de tratamento de efluentes por lodos ativados de uma fábrica de papel reciclado, apresentou uma concentração excessiva de bactérias filamentosas, que ocasionavam o intumescimento filamentosos. Esta condição foi ideal para a execução dos testes e determinação das dosagens de talco ideais para redução do índice volumétrico do lodo (IVL).

Os flocos apresentavam-se mal formados, tendo formatos irregulares devido à presença excessiva de bactérias filamentosas no interior dos mesmos. No entanto, não foi observada a presença de bactérias formadoras de flocos dispersas. As concentrações de bactérias filamentosas livres entre os flocos foram reduzidas, por causa da associação delas com os flocos.

Devido à presença das bactérias filamentosas no interior dos flocos biológicos, estes apresentaram tamanhos variáveis, sendo sempre inferiores a 100 μm .

De acordo com a escala de concentração de organismos filamentosos proposta por JENKINS *et al.* (2003), observou-se uma presença abundante da

espécie Tipo 021N, sendo esta da bactéria responsável pelo intumescimento filamentoso do lodo (Figura 4.1).

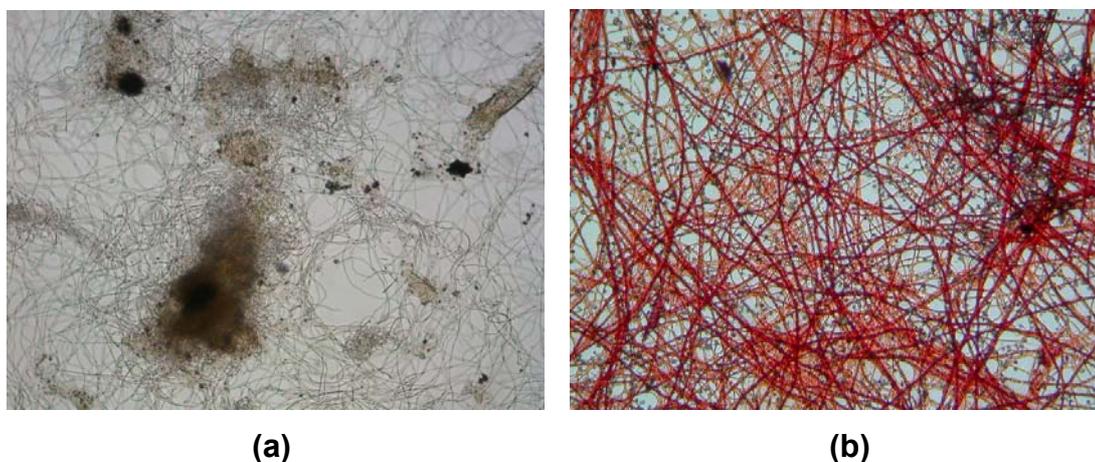


Figura 4.1 – Microfotografias de contraste de fase do lodo biológico utilizado neste experimento: **(a)** amostra fresca do lodo evidenciando concentração excessiva de bactérias filamentosas (100x) e **(b)** amostra de lodo corada, utilizada na identificação da bactéria filamentososa TIPO 021N (1.000x).

A bactéria TIPO 021N apresenta filamentos retos ou levemente curvos, com diâmetro aproximado do filamento de 1 a 2 μm , comprimento do filamento que podem chegar até a 5.000 μm . Os filamentos geralmente estão associados aos flocos, fazendo pontes entre eles, mas podem crescer dispersos na solução do lodo. As células apresentam coloração de Gram negativa, coloração de Neisser positiva para as células e negativa para os filamentos, coloração de poly- β -hidroxybutirato positiva.

A bactéria TIPO 021N caracteriza-se por formar pontes entre os flocos, impossibilitando a aproximação entre eles, dificultando a sedimentação do lodo. Como consequência, a manta de lodo no decantador secundário permanece ascendente, o que ocasiona grandes massas de sólidos suspensos totais no efluente tratado. Devido à essa dificuldade de interação entre os flocos ocasionada por esta espécie, o seu intumescimento torna-se bastante agressivo e excessivo.

Segundo JENKINS *et al.* (2003) e GRADY *et al.* (1999) o crescimento desse microrganismo está associado a diversos fatores, tais como a deficiência

de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, presença de substratos facilmente biodegradáveis, principalmente ácidos graxos voláteis de cadeia curta e açúcares simples, e septicidade no efluente com a presença de sulfeto.

4.1.2. Seleção do melhor talco

Os resultados obtidos foram baseados nos índices de sedimentabilidade do lodo. Esses índices foram quantificados pela análise do IVL, cujos valores obtidos para o tempo de reação de cinco e 16 horas são apresentados na Figura 4.2 e 4.3, respectivamente.

De um modo geral, todos os talcos contribuíram para a redução do IVL, no entanto, os tratamentos com os talcos OD10 e OD325 proporcionaram valores de IVL menores em comparação com os demais e em relação ao controle.

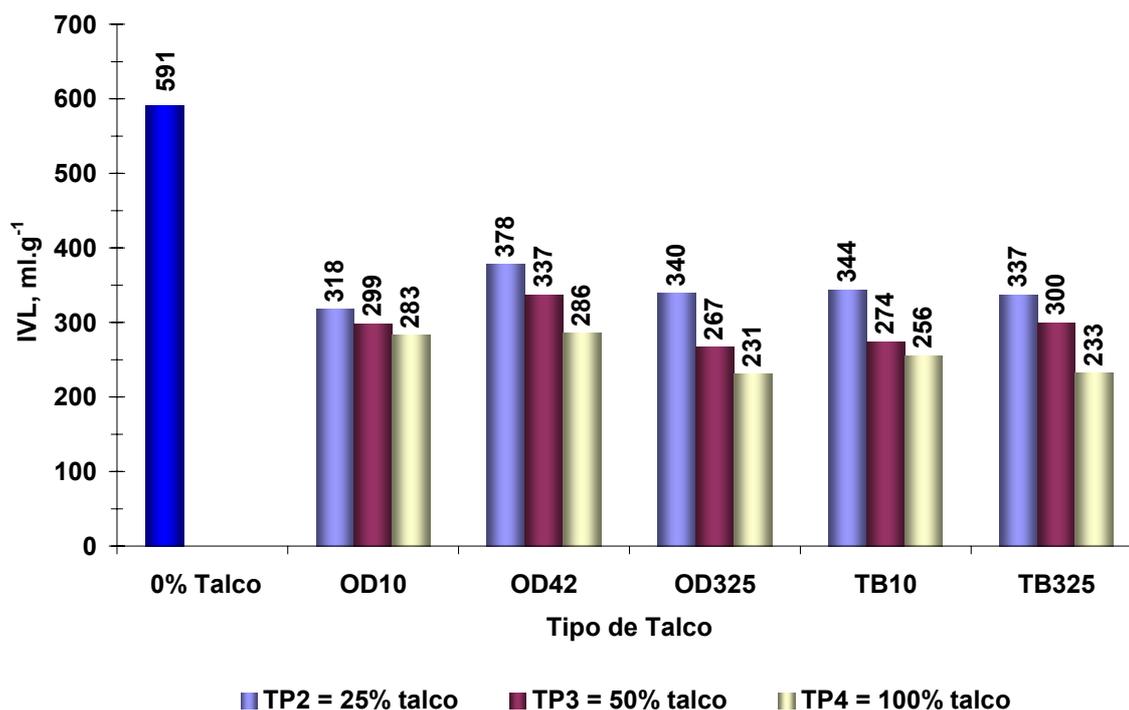


Figura 4.2 – Comportamento do IVL, utilizando diferentes formulações e concentrações de talco no tempo de reação de cinco horas.

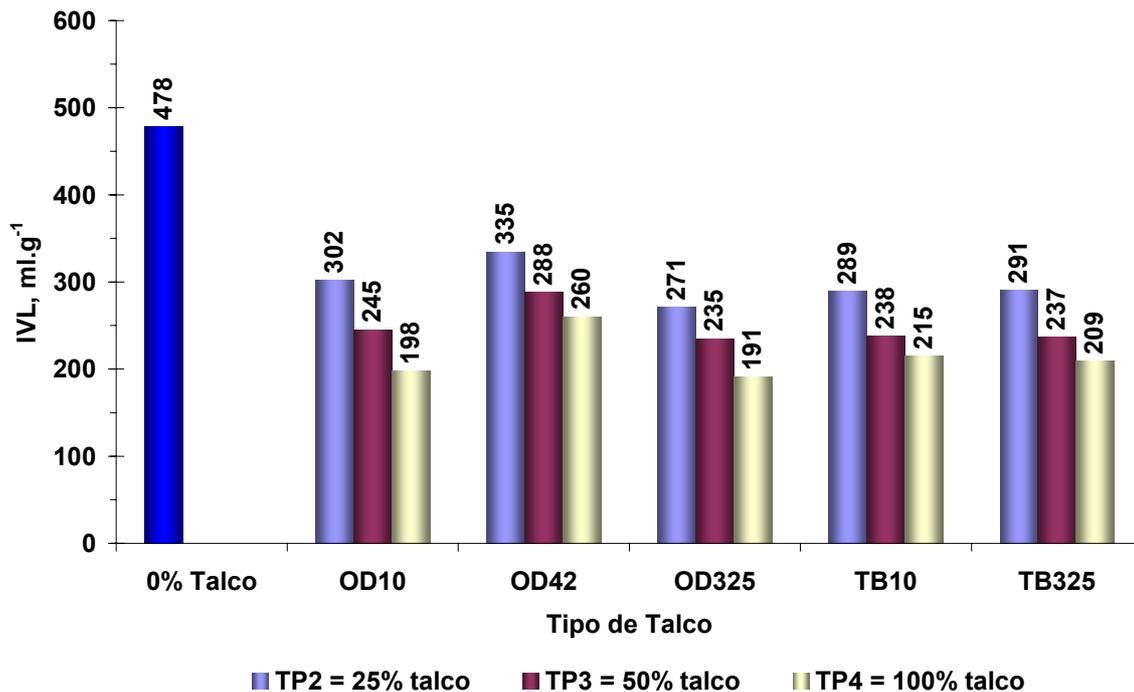


Figura 4.3 – Comportamento do IVL, utilizando diferentes formulações e concentrações de talco no tempo de reação de 16 horas.

Para o tempo de reação de cinco horas, o talco OD10 obteve um IVL abaixo de 318 ml.g⁻¹ e, o talco OD325, valores abaixo de 340 ml.g⁻¹ para as três concentrações de talco. Já para o tempo de reação de 16 horas, o talco OD325 alcançou melhores resultados para todos os tratamentos, obtendo valores 271 ml.g⁻¹ para a concentração de 50% de talco, 235 ml.g⁻¹ para a concentração de 75% de talco e 191 ml.g⁻¹ para a concentração de 100%. Estes valores indicam que a taxa de redução do IVL é diretamente proporcional à concentração de talco aplicado ao sistema.

Apesar de ter havido uma redução do valor do IVL comparativamente ao teste em branco, estes valores ainda estão aquém de valores ideais de sedimentabilidade do lodo. De acordo com SPERLING, (1997), valores de IVL acima de 200 ml.g⁻¹ são considerados ruins e acima de 300 ml.g⁻¹ são considerados péssimos.

O talco OD 325 alcançou os melhores resultados para redução do IVL nos dois tempos de reação (cinco e 16 horas). Esta melhora na sedimentabilidade foi, principalmente, devido à maior densidade desse talco em comparação com os demais (Quadro 3.3), fato este que o qualifica como um bom agente lastrante.

O efeito do talco em relação ao tempo está relacionado à mudança gradual na estrutura do floco, ou seja, incorporação de talco no floco biológico, melhorando, com isto, o seu peso e aumentando a velocidade de sedimentação, implicando no aumento da sedimentabilidade.

Resultados semelhantes foram encontrados por VANDERHASSELT e VERSTRATE (1999), que verificaram o efeito de aditivos na sedimentação do lodo. De acordo com os resultados obtidos por esses autores, o efeito positivo do talco na estabilização da estrutura do floco foi observado a partir de 15 horas após sua dosagem.

Com o talco OD 325, eleito como o melhor talco capaz de reduzir o IVL, dentre os testados, foram conduzidos experimentos mais específicos, para avaliar o seu efeito no controle do *bulking* filamentoso, na eficiência de remoção de matéria orgânica e, conseqüentemente, na população microbiológica do tratamento de efluentes.

4.2. Avaliação e determinação das dosagens ótimas do talco escolhido no controle do intumescimento do lodo

4.2.1. FASE 1: Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção da θ_c constante

4.2.1.1. Análise quantitativa do IVL

Primeira Aplicação de talco

De uma maneira geral, observa-se que durante toda a primeira aplicação do talco (Figura 4.4), os valores de IVL para o tratamento controle, ou seja, tratamento sem adição de talco, encontraram-se, desde o primeiro dia de tratamento, sempre superiores a 220 ml.g⁻¹, atingido valores máximos de até 270 ml.g⁻¹. Esses valores mostram que, durante a execução do experimento, o lodo biológico utilizado apresentou baixos índices de sedimentabilidade, sendo este classificado, segundo VON SPERLING (1997), como ruim. Neste tratamento, devido à baixa sedimentabilidade do lodo, foram observados perdas de sólidos junto ao efluente tratado durante a etapa de sedimentação na maioria dos ciclos.

Para os demais tratamentos, nos quais foram utilizadas concentrações crescentes de talco, no primeiro dia do tratamento, após a aplicação, houve uma redução do índice volumétrico do lodo (IVL) inversamente proporcional à dosagem de talco no tanque de aeração, obtendo-se valores do IVL de 172, 141, 125 e 103 ml.g^{-1} , para os tratamentos T2, T3, T4 e T5, respectivamente, estando estes classificados como de média sedimentabilidade.

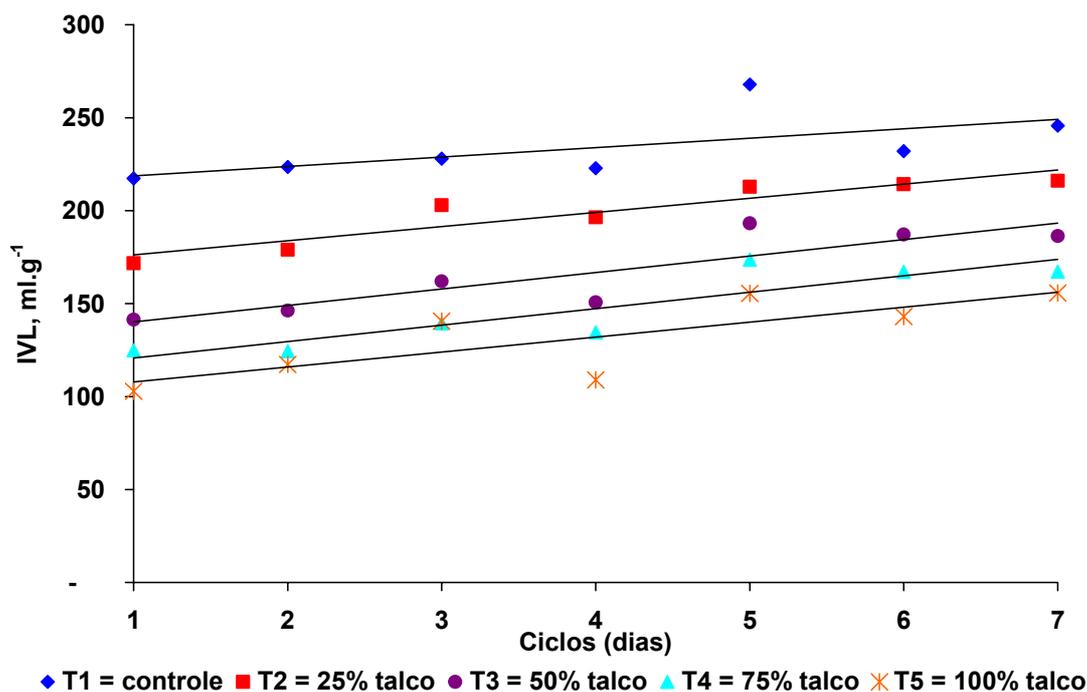


Figura 4.4 – Índice volumétrico do lodo (IVL) *versus* ciclos (dias) na primeira aplicação de talco.

Na Figura 4.5, pode-se observar que os melhores resultados de sedimentabilidade foram obtidos nos tratamentos T4 e T5, nos quais foram aplicadas concentrações de 75% e 100% de talco sobre a concentração de SSTTA do lodo, em comparação com os demais tratamentos.

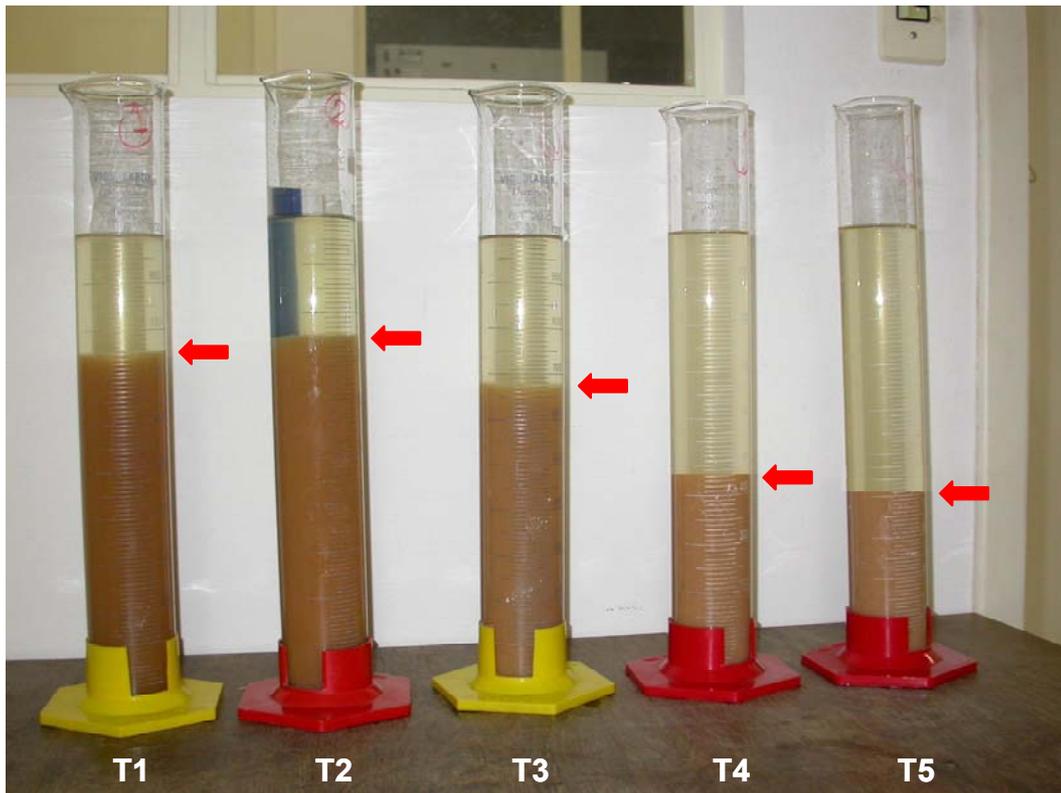


Figura 4.5 – Sedimentação do lodo biológico após três horas de decantação. Da esquerda para direita: controle, 25%, 50%, 75% e 100% de talco em relação aos SSTTA.

Equações de regressão foram ajustadas para descrever o comportamento do índice volumétrico do lodo (IVL) em função dos ciclos nos cinco tratamentos. Dessa forma, pôde-se avaliar o efeito das concentrações crescentes de talco sobre o sistema biológico. As equações de reta ajustadas para o IVL em função do tempo em cada um dos cinco tratamentos encontram-se no Quadro 4.1.

De acordo com os resultados mostrados na Figura 4.4 e com as equações de regressão apresentadas no Quadro 4.1, constata-se que os tratamentos nos quais foi adicionado talco apresentam uma alta taxa de incremento, ou seja, alto coeficiente angular da reta, acarretando expressivo aumento do IVL com o passar do tempo, revelando, assim, um efeito temporário do talco no controle do *bulking* filamentoso do lodo.

Quadro 4.1 – Equações para as retas ajustadas do IVL em função tempo de tratamento para a primeira aplicação de talco

Tratamentos	Equações ajustadas $*y = ax+b$	R ²	Intervalo de confiança (IC)**
T1	$y = 5,0744x + 213,59$	0,3925	(-2,1625) – (12, 3768)
T2	$y = 7,6248x + 168,57$	0,8645	(4, 076) – (11,0668)
T3	$y = 8,8573x + 131,31$	0,7717	(3,3732) – (14, 3410)
T4	$y = 8,827x + 111,99$	0,7953	(3,6321) – (14,0107)
T5	$y = 8,034x + 99,842$	0,7221	(7,8540) – (15,3574)

*y = índice volumétrico do lodo (IVL) e x = ciclos (dias); **95% de probabilidade de que a média do coeficiente angular esteja compreendida entre o IC.

Até o quinto dia do experimento, o IVL aumentou gradativamente, ou seja, na medida que foram realizados os descartes do lodo, o efeito do talco foi reduzindo, indicando, além do efeito de sua dosagem, que a concentração em relação à biomassa presente no reator biológico influencia significativamente na sedimentabilidade do lodo. Deve-se considerar também que parte do talco foi retirado junto com o descarte do lodo, diminuindo seu poder de agente lastrante.

Fazendo uma comparação entre os intervalos de confiança do coeficiente angular de cada uma das retas de regressão ajustadas para os tratamentos onde foi adicionado talco, pode-se observar que, estatisticamente, devido à sobreposição destes intervalos, as retas apresentam-se paralelas entre si, ou seja, apresentam o mesmo coeficiente angular.

Com isso, verifica-se que o efeito do talco sobre o IVL apresenta o mesmo comportamento nos quatro tratamentos em que foi utilizado talco no controle *bulking* filamentoso, diferindo apenas relativamente quanto aos valores de IVL observados no início em cada um dos tratamentos, ou seja, o distanciamento entre as curvas está relacionado com a concentração de talco aplicada no início do tratamento biológico.

A concentração de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA) nos experimentos em que foram aplicadas as maiores dosagens de talco manteve-se durante a primeira aplicação em valores muitos altos (Figura 4.6).

Valores máximos de 9.000 mg.l^{-1} e 7.500 mg.l^{-1} foram observados nos tratamentos T5 e T4, respectivamente.

De acordo com METCALF e EDDY (2003), as concentrações máximas de SSTTA são geralmente limitadas em $4.500 - 5.000 \text{ mg.l}^{-1}$. Algumas limitações práticas impõem, no entanto, os limites mencionados. Diante disto, dois aspectos são de grande importância.

Primeiro, as concentrações de SSTTA acima desse limite exigem unidades de decantação secundária de maiores dimensões. Assim, grandes áreas de decantação secundária seriam necessárias para compensar as grandes cargas de SSTTA afluentes em tal unidade. Uma maneira de se controlar e diminuir a concentração de sólidos a serem aplicados no decantador secundário, seria o aumento da vazão de descarte do lodo, o que diminuiria a taxa de aplicação de sólidos (TAS) nos decantadores.

Outro aspecto está relacionado com a taxa de transferência de oxigênio à biomassa, que é prejudicada devido à presença de valores de sólidos elevados, como encontrados na Figura 4.6.

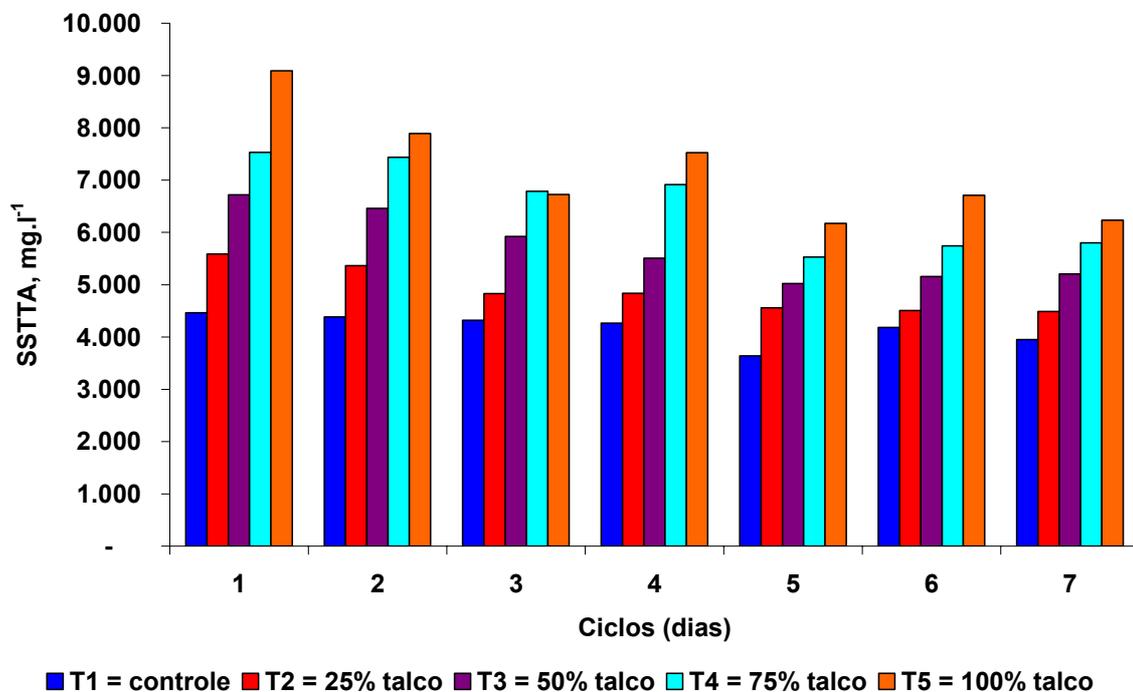


Figura 4.6 – Média de duas repetições diárias da concentração de sólidos suspensos totais (SSTTA) durante a primeira aplicação de talco.

De uma maneira geral, verifica-se o curto efeito do talco na melhoria da sedimentabilidade sobre o sistema de tratamento, sendo necessário, após sete dias, realizar uma nova aplicação. Sendo assim, tornou-se preciso novamente a adição de talco para controlar o *bulking* filamentoso.

Segunda aplicação de talco

Na segunda aplicação sucessiva de talco (Figura 4.7), os valores de IVL para o tratamento controle (T1) sofreram uma ligeira queda, devido a um decréscimo ocasionado pelo arraste de sólidos no decantador secundário. No entanto, os valores de IVL permaneceram relativamente altos, na faixa de 202 ml.g^{-1} a 250 ml.g^{-1} , caracterizando um lodo de sedimentabilidade ruim.

Nos demais tratamentos, nos quais foram adicionadas concentrações crescentes de talco no reator biológico, obteve-se melhor redução de IVL comparado ao efeito do talco no primeiro dia de aplicação da etapa anterior. Os valores para o IVL no primeiro dia da segunda aplicação de talco foram de 174 ml.g^{-1} e 137 ml.g^{-1} para os tratamentos T2 e T3, respectivamente. Já para os tratamentos com maior concentração de talco, houve uma melhora substancial em relação à redução do IVL, sendo encontrados os valores de 97 ml.g^{-1} e 76 ml.g^{-1} para os tratamentos T4 e T5, respectivamente. Ressalta-se que VON SPERLING (1997) classifica esses valores de IVL como sendo de boa sedimentabilidade.

Essa constatação de melhoria na sedimentabilidade do lodo nos tratamentos com maior concentração de talco em relação aos SSTTA está relacionada ao efeito acumulativo de talco no sistema biológico de tratamento. Assim, a permanência do talco relativo à aplicação anterior ajudou numa melhoria do sistema.

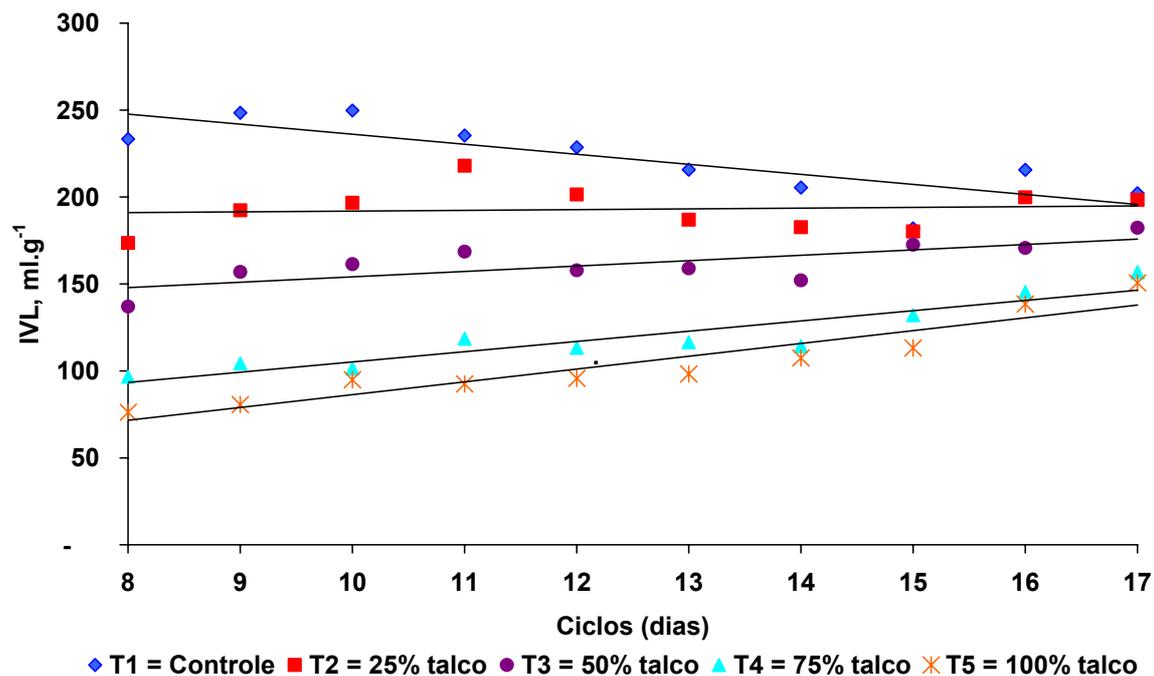


Figura 4.7 – Índice volumétrico do lodo (IVL) *versus* ciclos (dias) na segunda aplicação sucessiva de talco.

Para, novamente, averiguar o comportamento do índice volumétrico do lodo (IVL) em função dos ciclos, foram ajustadas equações de regressão (Quadro 4.2).

De posse dos resultados mostrados na Figura 4.7 e das equações de regressão apresentadas no Quadro 4.2, pode-se verificar que os tratamentos com adição de talco apresentaram um aumento linear do IVL ao longo do tempo, mas esta taxa de incremento, ou seja, o coeficiente angular da reta, apresentou menores valores em relação à primeira aplicação. Este fato confirma um efeito positivo na melhoria de sedimentabilidade relativo ao acúmulo de talco da aplicação anterior.

Quadro 4.2 – Equações das retas ajustadas do IVL em função tempo de tratamento para a segunda aplicação sucessiva de talco

Tratamentos	Equações ajustadas $*y = ax+b$	R ²	Intervalo de confiança (IC)**
T1	$y = -5,769x + 293,75$	0,6591	(-9,1472) – (-2,3194)
T2	$y = 0,4364x + 187,5$	0,6107	(-2,9845) – (2,8088)
T3	$y = 3,1014x + 123,02$	0,6599	(2,9162) – (5,3383)
T4	$y = 5,8965x + 46,204$	0,8497	(3,8344) – (7,9352)
T5	$y = 7,351x + 12,87$	0,8768	(5,0613) – (9,6174)

*y = índice volumétrico do lodo (IVL) e x = ciclos (dias); **95% de probabilidade de que a média do coeficiente angular esteja compreendida entre o IC.

Em relação ao comportamento das retas obtidas por meio da regressão linear, uma nova comparação entre os intervalos de confiança do coeficiente angular de cada uma das retas pode ser realizado. Observa-se que, estatisticamente, devido à sobreposição destes intervalos, as retas dos tratamentos T3, T4 e T5 são paralelas entre si, ou seja, apresentam o mesmo coeficiente angular.

Assim, verifica-se que o efeito do talco sobre o IVL possui o mesmo comportamento nestes três tratamentos, havendo apenas uma diferença quanto aos valores de IVL observados logo após a adição de talco em cada um dos tratamentos. Ou seja, o distanciamento entre as curvas está relacionado com a concentração de talco aplicada no início do tratamento biológico desta aplicação.

Já para o tratamento T2, no qual foi adicionado 25% de talco em relação aos SSTTA, pode-se verificar, por meio do intervalo de confiança do coeficiente angular, que não houve incremento nem decréscimo do IVL durante a segunda aplicação sucessiva de talco para este tratamento. Este fato pode ser explicado devido à reduzida proporção de talco aplicado em relação à biomassa presente no reator e ao efeito do acúmulo de talco da aplicação anterior, que reduziu a efetividade do talco, ou seja, diminuiu significativamente a amplitude de seu coeficiente angular.

A Figura 4.8, mostra a distribuição de SSTTA durante a segunda adição de talco. Os valores desses sólidos encontram-se bastante superiores ao observado

durante a aplicação anterior, obtendo valores máximos de 12.000 e 9.500 mg.l⁻¹, para os tratamentos T5 e T4, respectivamente. O motivo deste aumento é o acúmulo de talco que foi incorporado à composição do lodo biológico devido à primeira adição de talco.

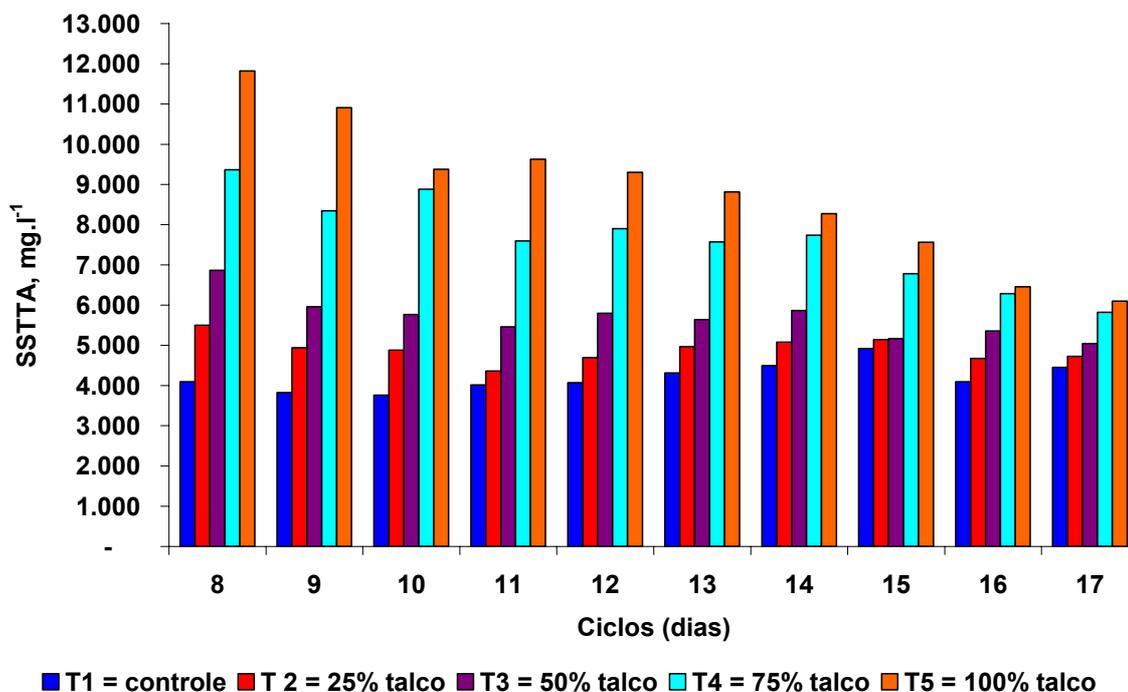


Figura 4.8 – Média de duas repetições diárias da concentração de sólidos suspensos totais (SSTTA) durante a segunda aplicação de talco.

Vale lembrar que os valores de SSTTA estão bem acima dos valores máximos de sólidos a serem aplicados nas unidades de decantação secundária, o que pode acarretar efeitos de sobrecarga nesta unidade, além de dificultar a taxa de transferência de oxigênio nos reatores biológicos.

Nessa segunda aplicação de talco, percebe-se claramente que houve um prolongamento do efeito do talco em relação aos ciclos de reação, sendo isto constatado devido a reduções e manutenção do IVL em valores mais baixos. No entanto, de uma maneira geral, verifica-se o curto efeito do talco sobre o sistema, sendo necessário, após dez dias, realizar uma nova aplicação.

Vale ressaltar que estes dez dias desta aplicação corresponderam ao tempo de uma idade do lodo. Como, pelo próprio conceito deste parâmetro, esperou-se que todo reator fosse renovado para diminuir o efeito do talco ao

máximo sobre o sistema biológico de tratamento. Verificou-se que, no último ciclo de reação, os valores de IVL para todos os tratamentos estavam bem próximos.

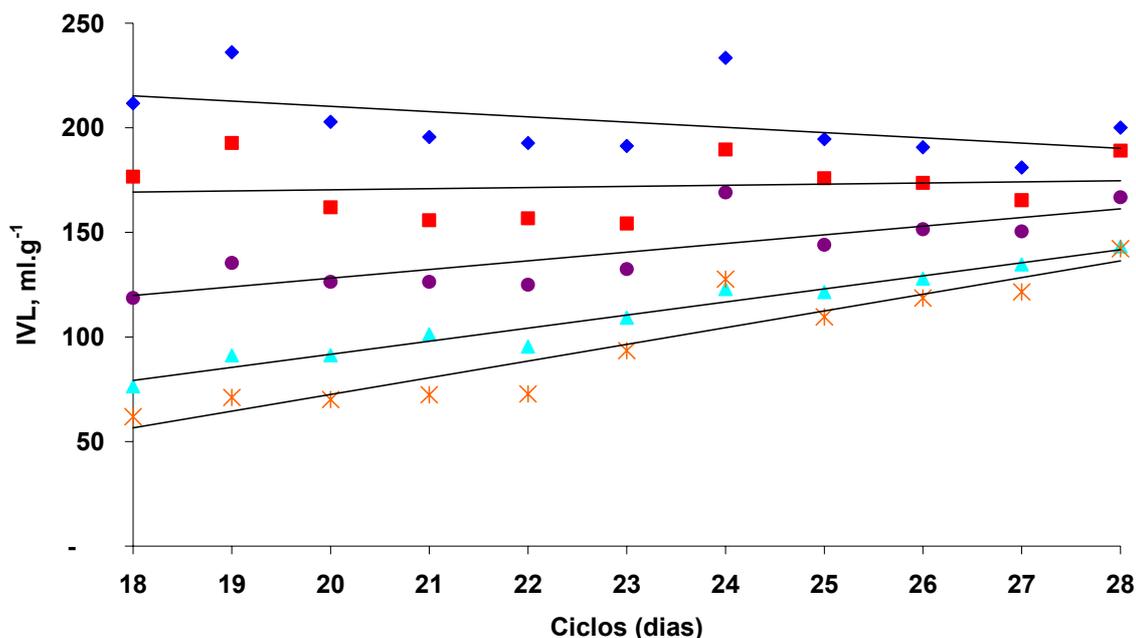
Sendo assim, após este período, tornou-se necessária, novamente, a adição de talco para controlar o *bulking* filamentoso do lodo.

Terceira aplicação de talco

Na terceira aplicação sucessiva de talco (Figura 4.9), os valores de IVL para o tratamento controle (T1) mantiveram-se praticamente constantes, sofrendo uma pequena tendência de queda ao longo do tempo, indicado a manutenção estável do sistema de tratamento. Estes valores mostram que, durante a execução de todo o experimento, o lodo biológico utilizado apresentou baixos índices de sedimentabilidade, sendo este classificado, segundo VON SPERLING (1997), como ruim.

Nos demais tratamentos, foi observada uma melhora substancial na redução de IVL comparada ao efeito das aplicações anteriores. Os valores para o IVL no primeiro dia da terceira adição de talco foram de 177 ml.g^{-1} e 119 ml.g^{-1} para T2 e T3, respectivamente. Já para os tratamentos com maior concentração de talco, ocorreram os menores valores de IVL observados durante todo o tempo de execução do experimento. Foram encontrados valores de IVL de 76 ml.g^{-1} e 62 ml.g^{-1} para T4 e T5, respectivamente. De acordo com VON SPERLING (1997), esses valores de IVL são classificados como sendo de boa sedimentabilidade.

Novamente com o objetivo de verificar o comportamento do IVL ao longo do tempo, foram ajustadas equações de regressão para os cinco tratamentos. Dessa forma, pôde-se avaliar o efeito das concentrações crescentes de talco sobre o sistema biológico. As equações de reta ajustadas para o IVL em função do tempo em cada um dos cinco tratamentos encontram-se no Quadro 4.3.



◆ T1 = Controle ■ T2 = 25% talco ● T3 = 50% talco ▲ T4 = 75% talco ✕ T5 = 100% talco

Figura 4.9 – Índice volumétrico do lodo (IVL) versus ciclos (dias) na terceira aplicação sucessiva de talco.

Quadro 4.3 – Equações das retas ajustadas do IVL em função tempo de tratamento para a terceira aplicação sucessiva de talco

Tratamentos	Equações ajustadas $*y = ax+b$	R ²	Intervalo de confiança (IC)**
T1	$y = -2,5119x + 260,52$	0,3232	(-3,9394) – (2,2485)
T2	$y = 0,5514x + 159,28$	0,6515	(-2,7158) – (3,7522)
T3	$y = 4,1448x + 45,197$	0,6404	(1,8347) – (6,5106)
T4	$y = 6,2468x - 33,224$	0,9607	(5,2974) – (7,2479)
T5	$y = 7,9831x - 87,144$	0,8723	(5,7032) – (10,3330)

*y = índice volumétrico do lodo (IVL) e x = ciclos (dias); **95% de probabilidade de que a média do coeficiente angular esteja compreendida entre o IC.

De acordo com os resultados mostrados na Figura 4.9 e com as equações de regressão apresentadas no Quadro 4.3, constata-se que os tratamentos com adição de talco apresentam uma similar taxa de incremento, ou seja, coeficiente angular da reta estável em comparação com a segunda aplicação do talco. Isto

confirma um efeito positivo na melhoria de sedimentabilidade relativo à incorporação de talco na biomassa das aplicações anteriores.

Até o sétimo dia do experimento, o IVL aumentou gradativamente, ou seja, na medida que os sólidos suspensos totais aumentaram, o efeito do talco foi reduzido, indicando que sua concentração e proporção em relação à biomassa presente no reator biológico influenciam significativamente na sedimentabilidade do lodo.

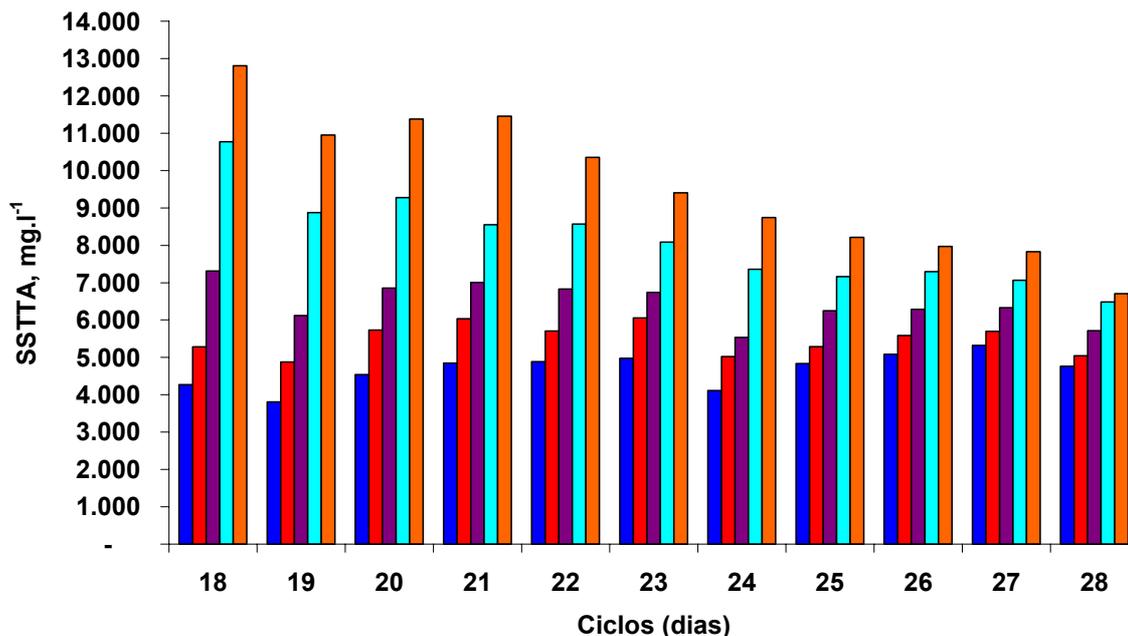
Comparando-se o comportamento das retas obtidas por meio da regressão linear, uma nova inferência pode ser feita em relação aos intervalos de confiança do coeficiente angular de cada uma das retas. Observa-se que, estatisticamente, devido à sobreposição destes intervalos, as retas dos tratamentos T3, T4 e T5 apresentam-se paralelas entre si, ou seja, apresentam o mesmo coeficiente angular.

Como verificado na terceira aplicação sucessiva de talco, o efeito do talco sobre o IVL apresenta o mesmo comportamento nestes três tratamentos, havendo apenas uma diferença quanto aos valores de IVL observados logo após a adição de talco em cada um dos tratamentos.

Novamente no tratamento onde foi aplicada uma menor dosagem de talco (T2) em relação aos SSTTA, pode-se verificar, por meio do intervalo de confiança do coeficiente angular, que não houve nenhum incremento ou decréscimo do IVL durante esta aplicação. Este fato confirma a reduzida efetividade de redução do IVL por baixas concentrações de talco em relação aos SSTTA.

Nessa terceira aplicação sucessiva de talco, conforme constatado na segunda aplicação, houve um prolongamento do efeito do talco em relação aos ciclos de reação. No entanto, de uma maneira geral, verifica-se o curto efeito do talco sobre o sistema, sendo necessário, após dez dias, realizar uma nova aplicação.

A distribuição de SSTTA durante a terceira aplicação sucessiva de talco encontra-se na Figura 4.10. Os valores desses sólidos encontram-se bastante superiores aos observados durante a aplicação anterior, obtendo valores máximos de 12.800 e 10.700 mg.l^{-1} , para os tratamentos T5 e T4, respectivamente. O motivo deste aumento é devido o acúmulo de talco que foi incorporado à composição do lodo biológico, devido às aplicações sucessivas.



■ T1 = controle ■ T2 = 25% talco ■ T3 = 50% talco ■ T4 = 75% talco ■ T5 = 100% talco

Figura 4.10 – Média de duas repetições diárias da concentração de sólidos suspensos totais (SSTTA) durante a terceira aplicação de talco.

Valores de sólidos como estes são inoperantes em estações de tratamento de efluentes, comprometendo a transferência de oxigênio do sistema de aeração do reator biológico e, além disso, a área superficial do sistema de decantação secundária seria insuficiente para a grande taxa de aplicação de sólidos.

4.2.1.2. Análise qualitativa do IVL

Para avaliar qualitativamente o efeito de adições sucessivas de talco sobre o sistema biológico quanto à melhoria de sedimentabilidade do lodo, a variância das médias de IVL obtidas em cada tratamento foi analisada e está reunida no quadro de ANOVA (Quadro 4.4).

De acordo com os resultados mostrados no Quadro 4.4, existe pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos, estatisticamente diferente de zero, a 1% de probabilidade. Assim, as médias dos tratamentos foram comparadas duas a duas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados médios de IVL obtidos para os tratamentos em cada uma das etapas estão no Quadro 4.5.

Quadro 4.4 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos onde foram feitas aplicações sucessivas de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	65712,4750	66,69*
Aplicações	2	7179,8523	7,29
Tratamentos x Aplicações	8	688,3239	0,7
Resíduo	125	985,3476	
Total	139		
CV (%)		19,61	

*significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.5 – Comparação entre médias gerais de IVL de cada tratamento e aplicações nos conjuntos experimentais em que foram feitas aplicações sucessivas de talco no reator biológico

Aplicações	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	234	199	167	147	125
2	222	193	162	120	105
3	203	172	141	111	96
Média Geral**	220a	180b	157c	126d	109d

**Média geral de IVL seguidas por uma mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Analisando o conjunto de dados médios do IVL, pode-se verificar que o tratamento controle (T1), no qual não foi aplicado talco, apresentou o maior valor médio geral do IVL, caracterizando um lodo de sedimentabilidade ruim, fato este que confirma estatisticamente que a adição de talco acarreta significativas melhorias na sedimentabilidade do lodo.

Um outro fator observado é que, devido à baixa sedimentabilidade do tratamento controle, T1, houve arraste de lodo no efluente tratado.

Já para os tratamentos em que foram adicionadas dosagens crescentes de talco em relação aos sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA),

verifica-se que existe uma diferença estatisticamente significativa de sedimentabilidade em relação à dosagem aplicada nos reatores, ou seja, os valores médios gerais do IVL são inversamente proporcionais à dosagem de talco aplicada.

Em T2 e T3 foram verificadas reduções nos valores do IVL, de 14,3% e 28,7%, em comparação ao tratamento controle, respectivamente. No entanto analisando o valor absoluto deste índice, pode-se afirmar que tais melhorias quanto a sedimentabilidade, não são suficientes para o sistema biológico de tratamento de efluente, ficando muito fora do ideal.

Os melhores desempenhos quanto à sedimentabilidade do lodo foram obtidos nos tratamentos com a maior dosagem de talco, tendo reduções do IVL em relação ao tratamento controle de 42,7% e 50,5%, para os T4 e T5, respectivamente. Os valores médios gerais do IVL são estatisticamente iguais nestes dois tratamentos.

Além da redução de perda de sólidos junto ao efluente tratado, têm-se outras vantagens quanto à melhoria na sedimentabilidade do lodo. Uma delas é que o lodo com boas características de sedimentabilidade tem a possibilidade de operar com maior flexibilidade a estação, pois implica em redução da vazão de reciclo e melhorias quanto ao adensamento e desidratação do lodo.

Apesar de constatado o efeito em curto prazo de melhorias de sedimentabilidade pelo uso do talco em torno de cinco a sete dias, ele demonstrou ser um eficiente agente lastrante, que aumenta o peso e a densidade do floco biológico e poderá ser utilizado como medida corretiva, ou seja, de maneira emergencial em condições severas de intumescimento, evitando a perda da eficiência de tratamento e de clarificação do efluente tratado.

Esse tempo também é o suficiente para corrigir as causas que favorecem o crescimento excessivo das bactérias filamentosas ou para criar condições favoráveis ao crescimento das bactérias formadoras de flocos. Como exemplo, pode-se citar o uso de medidas preventivas no controle do intumescimento do lodo como: controle das cargas orgânicas e de pH, ajuste da concentração de nutrientes e oxigênio dissolvido, uso de seletores biológicos, entre outras.

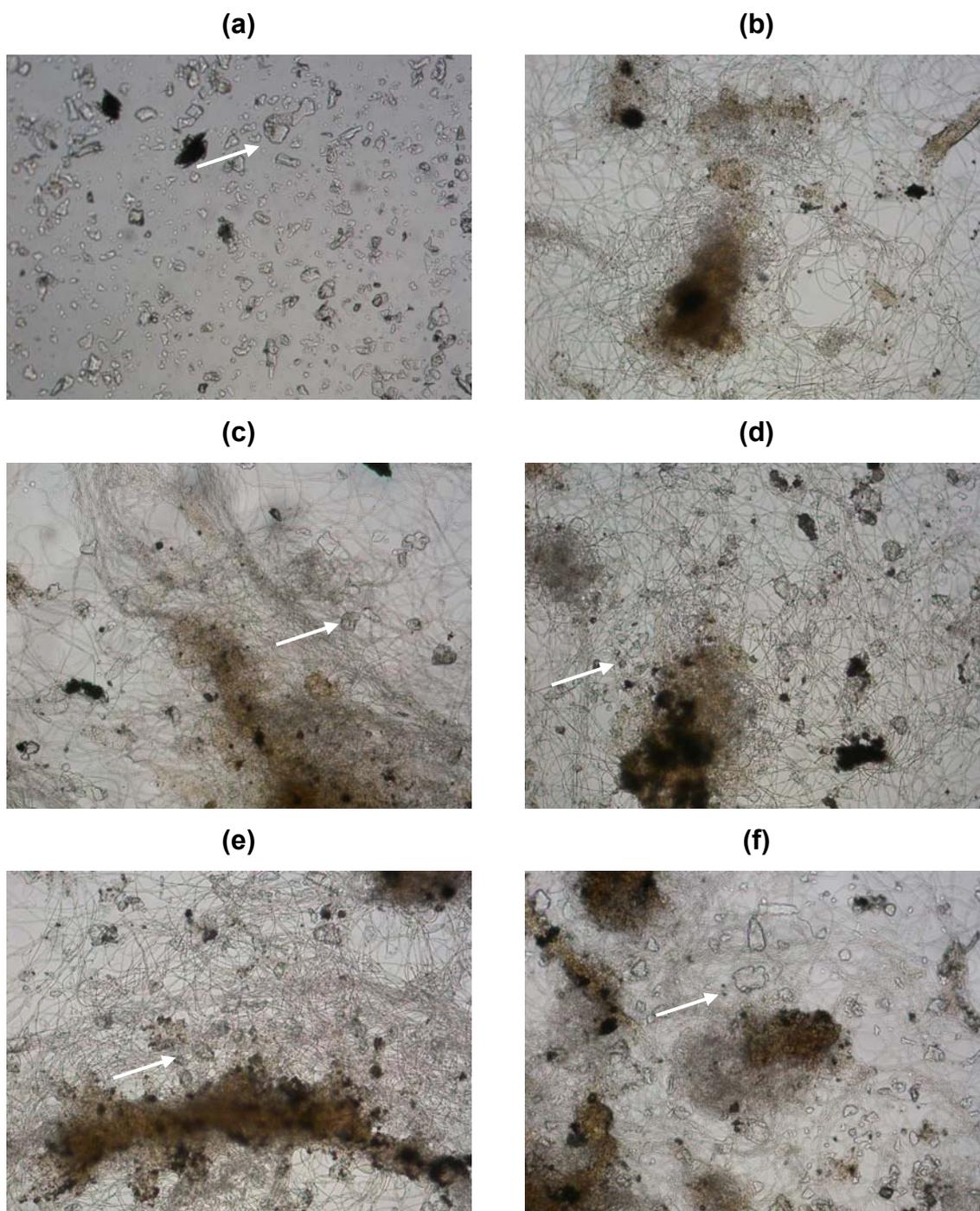
4.2.1.3. Análises microscópicas e composição biológica do lodo

Na Figura 4.11, encontram-se as microfotografias do lodo com o talco OD325. Na Figura 4.11 (a), tem-se uma microfotografia do talco OD 325 em um aumento de 100X, em que suas partículas podem ser observadas facilmente. Na Figura 4.10 (b) a (f) encontram-se as microfotografias de contraste de fase dos cinco tratamentos. Pode-se observar a concentração excessiva de bactérias filamentosas do lodo biológico em todos os tratamentos.

A bactéria filamentosa presente em abundância é TIPO 021N, bactéria comumente encontrada em lodos de tratamentos biológicos de efluentes de fabricas de papel (SOUZA, 2002).

Na Figura 4.11 (c) a (f) verifica-se que as partículas do talco se agregam no floco biológico, fortalecendo sua estrutura e aumentando o seu peso, de modo a facilitar sua sedimentação, caracterizando-se, assim, como um agente lastrante. Com isso, há uma queda nos valores de IVL dos tratamentos em que o talco está presente.

De acordo com GRAJA *et al.*(1998), BIDAULT *et al.* (1996) e CLAUSS *et al.* (1999), essa agregação hidrofóbica das partículas de talco junto ao floco biológico se deve à presença de exopolissacarídeos (EPS) dentro da matriz do floco biológico. Os EPS são compostos por varias substâncias, como proteínas, ácidos nucleicos e lipídeos, possuindo características hidrofóbicas.



OBS: As setas indicam os locais de interação entre o talco e os filamentos presentes no lodo biológico.

Figura 4.11 – Microfotografias de contraste de fase (100x), amostra fresca: **(a)** talco OD325 em solução de efluente utilizado neste experimento; **(b)** T1 = controle; **(c)** T2 = 25% talco; **(d)** T3 = 50% talco; **(e)** T4 = 75% talco e **(f)** T5 = 100% talco.

Nas Figuras 4.12 a 4.14, estão representadas as composições do lodo biológico, correlacionando a porcentagem de sólidos suspensos fixos no tanque de aeração (SSFTA) e sólidos suspensos voláteis (SSVTA).

A fração volátil dos sólidos suspensos que representa a fração orgânica (biomassa), apesar de não distinguir o material bioquimicamente ativo do material inerte do lodo, serve como base importante para a estimativa da concentração de microrganismos presentes nos reatores.

Para o tratamento controle (T1), verifica-se que, na composição do lodo biológico, a proporção SSVTA/SSFTA se manteve superior a 70%, durante as três aplicações de talco, indicando, com isso, uma maior concentração de biomassa em relação ao material inerte. Esses valores estão entre 70 e 85% de SSVTA/SSFTA, reportados por METCALF e EDDY, (2003).

Proporcionalmente em relação à concentração de talco aplicada sobre o sistema biológico de tratamento, há um acúmulo de talco nos reatores biológicos, mudando consideravelmente a composição do lodo, chegando a valores de 30 e 35% de SSVTA/SSFTA para os tratamentos T4 e T5, nos quais foram aplicadas as maiores dosagens de talco, sendo necessário um maior volume de descarte de lodo para manter as condições operacionais do sistema quando este for utilizado em uma estação de tratamento de efluentes.

Pode-se observar que, com o passar dos ciclos de tratamento biológico, a proporção de material inerte (SSFTA) diminuiu, devido ao descarte da biomassa realizado para a manutenção da idade do lodo de dez dias. Mesmo tendo essa diminuição da proporção inerte, verifica-se o acúmulo desse material (talco), que passa a fazer parte da composição da biomassa.

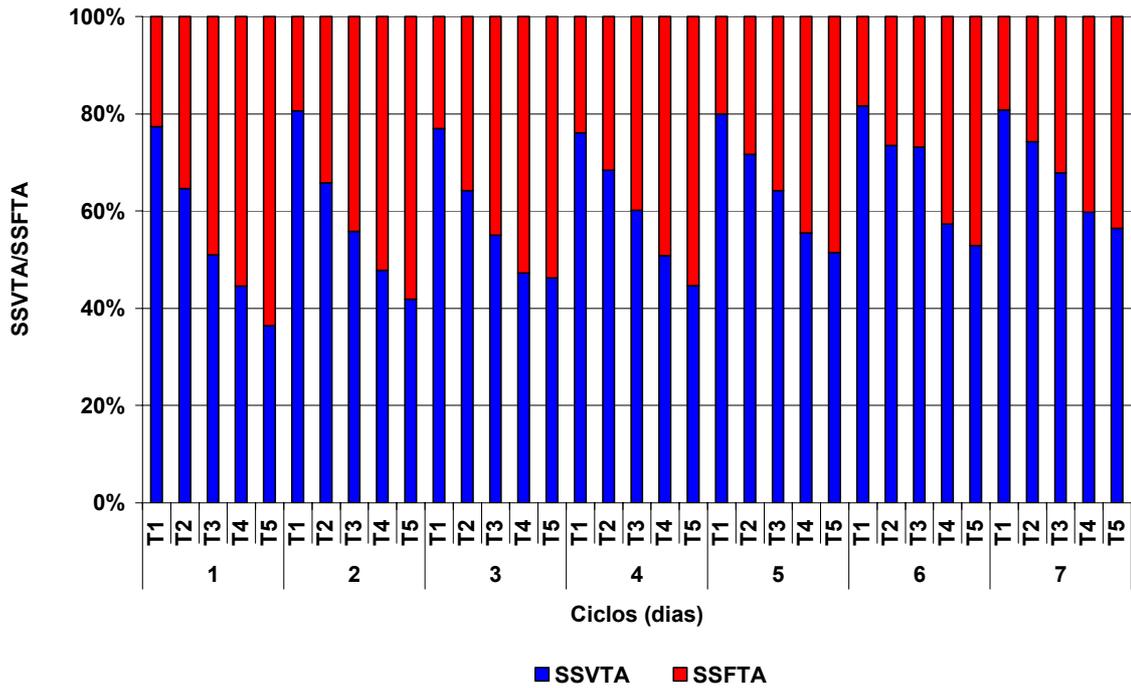


Figura 4.12 – Composição do lodo biológico, para a primeira aplicação de talco, relacionando à proporção de SSFTA e SSVTA para os cinco tratamentos.

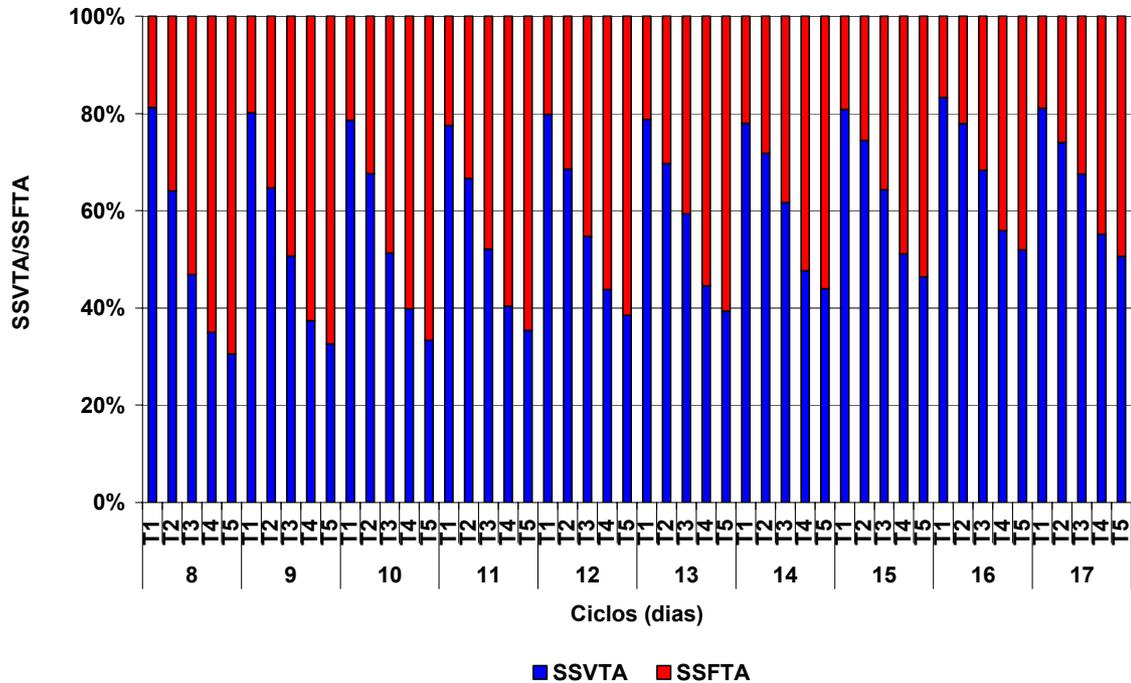


Figura 4.13 – Composição do lodo biológico, para a segunda aplicação de talco, relacionando à proporção de SSFTA e SSVTA para os cinco tratamentos.

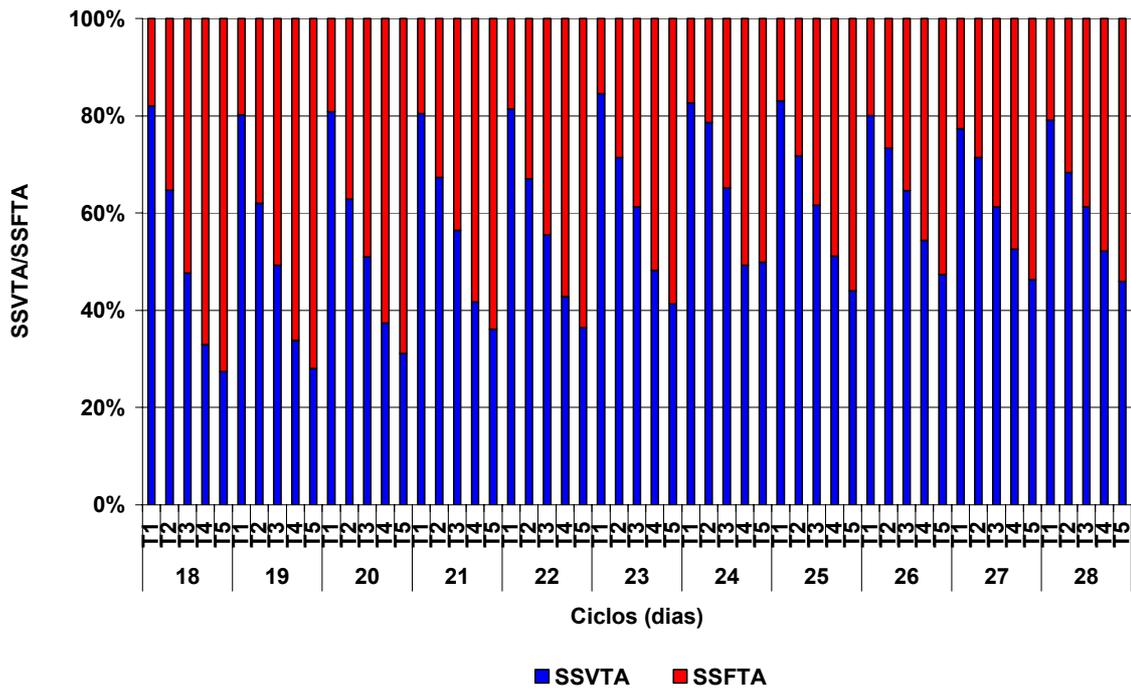


Figura 4.14 – Composição do lodo biológico para a terceira aplicação de talco, relacionando à proporção de SSFTA e SSVTA para os cinco tratamentos.

Apesar da composição biológica do lodo indicar uma maior proporção de SSFTA, ou seja, material inerte, nos tratamentos nos quais foi aplicado talco, o valor absoluto da concentração de biomassa, expressas em termos de SSVTA, não variou significativamente nos cinco tratamentos. Assim, pode-se verificar que o talco não influencia no crescimento/desenvolvimento da biomassa.

4.2.1.4. Avaliação da eficiência do sistema de tratamento

Para avaliar qualitativamente o efeito de adições sucessivas de talco sobre o sistema biológico quanto ao efeito sobre a biomassa, as variâncias das médias de SSVTA obtidas em cada tratamento e aplicação de talco foram analisadas e estão reunidas no quadro de ANOVA (Quadro 4.6; 4.8 e 4.10).

De acordo com os resultados mostrados nos Quadros 4.6; 4.8 e 4.10, verifica-se que não existem diferenças estatisticamente significativas a 1% de probabilidade entre as médias de SSVTA para os tratamentos em cada uma das aplicações de talco.

Os resultados médios de SSVTA obtidos para os tratamentos em cada uma das aplicações de talco estão nos Quadros 4.7; 4.9 e 4.11, respectivamente. Observa-se, pelos valores médios de biomassa, que estes sempre permaneceram superiores a 3.000 mg.l⁻¹. De acordo com VON SPERLING (1997), os valores típicos de SSVTA para sistemas de tratamento por lodos ativados de aeração prolongada variam entre 2.500 a 4.000 mg.l⁻¹.

Sistemas de aeração prolongada, como o utilizado neste estudo, têm uma grande concentração de SSVTA, ou seja, maior disponibilidade de biomassa para assimilar o substrato do efluente, resultando numa maior eficiência de remoção de carga orgânica (DQO) se comparado a outros sistemas de tratamento biológico.

Quadro 4.6 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos da primeira aplicação de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	552,88	0,02 ^{ns}
Resíduo	30	23097,17	
Total	34		
CV (%)		4,53	

^{ns} significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.7 – Comparação entre médias de SSVTA, expressos em mg.l⁻¹, em cada tratamento para a primeira aplicação de talco

Tratamentos	Médias Ordenadas ^{ns}
T3	3362
T4	3352
T2	3350
T5	3346
T1	3338

^{ns} não significativo a 1% de probabilidade para o teste F.

Quadro 4.8 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos da segunda aplicação de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	11660,32	0,21 ^{ns}
Resíduo	45	55032,53	
Total	49		
CV (%)		6,92	

^{ns} significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.9 – Comparação entre médias de SSVTA, expressos em mg.l⁻¹, em cada tratamento para a segunda aplicação de talco

Tratamentos	Médias Ordenadas ^{ns}
T5	3434
T2	3412
T1	3380
T4	3372
T3	3347

^{ns} não significativo a 1% de probabilidade para o teste F.

Quadro 4.10 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos da terceira aplicação de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	5843,71	0,06 ^{ns}
Resíduo	50	102997,28	
Total	54		
CV (%)		8,62	

^{ns} significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.11 – Comparação entre médias de SSVTA, expressos em mg.l^{-1} , em cada tratamento para a terceira aplicação de talco

Tratamentos	Médias Ordenadas ^{ns}
T2	3755
T1	3741
T4	3709
T3	3706
T5	3705

^{ns} não significativo a 1% de probabilidade para o teste F.

Nas Figuras 4.15 a 4.17, encontra-se a evolução da distribuição de SSVTA em cada uma das aplicações de talco.

Fazendo uma comparação como o tratamento controle em relação aos demais tratamentos nos quais foram aplicadas dosagens crescentes de talco, pode-se verificar que, durante todos os ciclos e em cada uma das aplicações, a concentração de biomassa não variou significativamente (Figuras 4.14 a 4.16). No entanto, entre as etapas, houve um ligeiro aumento da concentração de biomassa.

O aumento na concentração de biomassa pode ser explicado por dois motivos. Primeiro, por uma melhor adaptação da biomassa às condições laboratoriais e, segundo, por uma variação (aumento) na concentração de carga orgânica (DBO) do efluente a ser tratado.

A constatação da manutenção da concentração de biomassa é um indicativo de que o crescimento bacteriano não foi afetado pela presença de talco, comprovando, com isso, sua característica inerte, ou seja, quimicamente inativo.

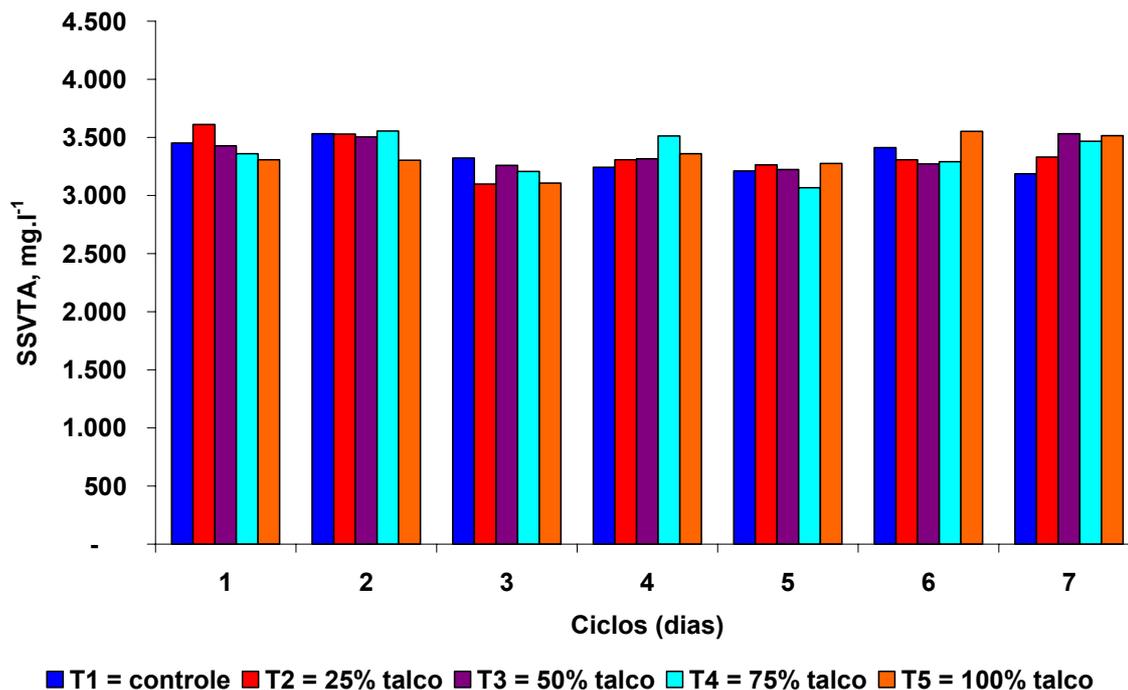


Figura 4.15 – Média de duas repetições diárias da concentração de biomassa expressa por SSVTA durante a primeira aplicação do talco.

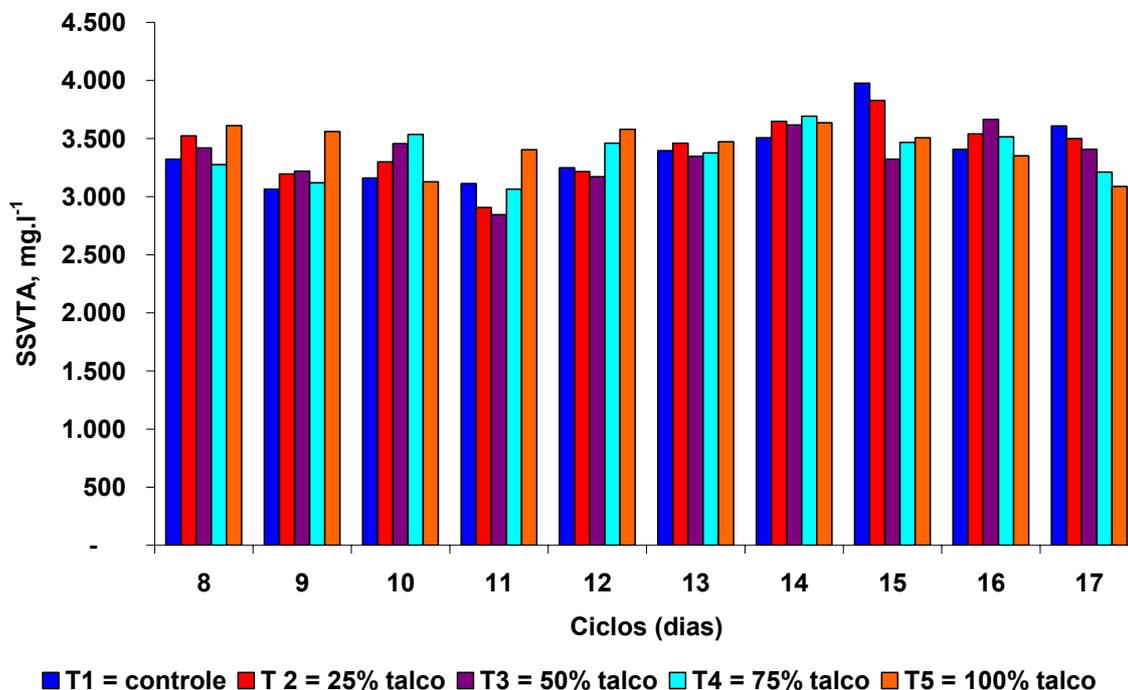


Figura 4.16 – Média de duas repetições diárias da concentração de biomassa expressa por SSVTA durante a segunda aplicação do talco.

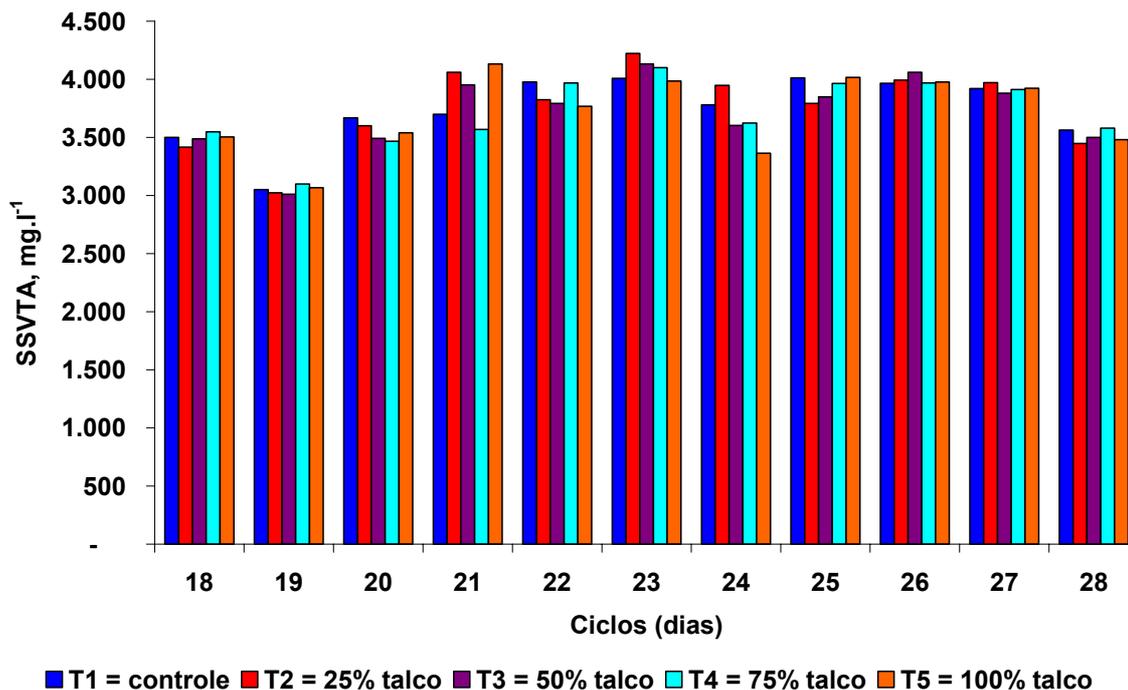


Figura 4.17 – Média de duas repetições diárias da concentração de biomassa expressa por SSVTA durante a terceira aplicação do talco.

Para avaliar o efeito da influência da utilização do talco sobre a atividade biológica e, por conseguinte, a remoção de matéria orgânica, foi aplicado o teste da análise de variância (ANOVA) sobre os valores médios de eficiência de remoção de DQO nos tratamentos e em cada uma das três aplicações sucessivas de talco (Quadro 4.12)

De acordo com os resultados mostrados no Quadro 4.12, verifica-se que não existem diferenças estatisticamente significativas a 1% de probabilidade entre as médias de remoção de DQO para os tratamentos.

Todos os tratamentos removeram mais que 94% da DQO, de modo que o maior valor desse parâmetro, medido para os efluentes tratados, não chegou a 160 mg.l⁻¹. Este valor está dentro limite máximo de remoção de DQO estipulado pela Deliberação Normativa da Comissão de Política Ambiental (COPAM) nº 46 de 1986, que é de 60%. Esta norma estabelece os padrões para a qualidade das águas e do lançamento de efluentes nas coleções de águas estaduais, nos moldes da Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 20 de 1986, substituída pela Resolução CONAMA nº 375 de 2005 (MINAS GERAIS, 1987).

Quadro 4.12 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos nos quais foram feitas aplicações sucessivas de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	0,6587	1,22 ^{ns}
Aplicações	2	8,3607	15,54
Tratamentos x Aplicações	8	0,7825	1,45
Resíduo	125	0,5381	
Total	139		
CV (%)		0,77	

^{ns} não significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Além disso, eficiências de remoção de DQO acima de 90% são superiores aos valores máximos reportados por VON SPERLING (1997) para sistema de tratamento biológico por lodos ativados. Isso ocorreu devido à grande biodegradabilidade da matéria orgânica proveniente de efluentes das indústrias de papel reciclado. Deve-se salientar que em um sistema laboratorial é mais fácil manter o controle operacional, otimizando, assim, o tratamento.

Analisando o conjunto de dados médios de remoção de DQO (Quadro 4.13), pode-se verificar que não houve diferenças, ocorrendo uma homogeneidade entre os dados observados. Assim, pode-se concluir que, estatisticamente, ocorreu a mesma eficiência de remoção de matéria orgânica nos cinco tratamentos.

Desta forma, fica comprovado que, qualitativamente, no tratamento controle (T1), comparado aos demais tratamentos em que foram adicionadas dosagens crescentes de talco (T2, T3, T4 e T5), não houve efeito algum dessa adição sobre o sistema biológico de tratamento. Comprova-se, mais uma vez a atuação inerte do talco sobre o sistema.

Quadro 4.13 – Comparação entre médias gerais de eficiência de remoção de DQO em cada dos tratamentos e aplicações sucessivas nos conjuntos experimentais

Aplicações	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	94,2	94,3	94,4	94,6	94,8
2	95,6	95,6	95,3	95,2	95,0
3	95,6	95,1	95,0	95,0	94,8
Média Geral ^{ns}	95,1	95,0	94,9	94,9	94,9

^{ns} não significativo a 1% de probabilidade para o teste F.

Verifica-se, com isso, que, além ser quimicamente inerte, insolúvel e melhorar os balanço hidrofobicidade/hidrofilicidade, o talco não afeta a eficiência do tratamento, o que prova sua compatibilidade com a biomassa.

4.2.2. FASE 2: Aplicações sucessivas de talco com controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante

Nesta fase, devido ao acúmulo de sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA) observado na fase anterior – que, operacionalmente, dificultaria a taxa de transferência de oxigênio no reator biológico e ocasionaria uma sobrecarga de sólidos no sistema de decantação secundária – optou-se por avaliar a utilização do talco no controle do intumescimento filamentoso em um sistema com controle operacional por meio da manutenção de SSTTA constante.

A concentração de SSTTA foi controlada a 4.500 – 5.000 mg.l⁻¹, faixa de valores de concentrações máximas de sólidos recomendadas pela literatura (METCALF e EDDY, 2003).

Antes de iniciar a FASE 2, estabeleceu-se um período de uma idade do lodo (dez dias), dos ciclos 29 a 39, o que foi necessário para minimizar o efeito do acúmulo de talco sobre os sistemas de tratamento da fase anterior. Neste período, não foram dosados os nutrientes, o que favoreceu o surgimento excessivo de bactérias filamentosas.

4.2.2.1. Análise quantitativa do IVL

Primeira Aplicação de talco

Na Figura 4.18, são mostrados os valores do índice volumétrico do lodo (IVL) da primeira aplicação de talco em função dos ciclos de tratamento biológico. Observa-se, de uma maneira geral, que, durante toda a primeira aplicação de talco, os valores de IVL para o tratamento controle encontraram-se, desde o primeiro dia de tratamento, sempre superiores a 220 ml.g^{-1} , atingido valores máximos de 255 ml.g^{-1} . Estes valores de IVL indicaram que o lodo biológico apresentou baixos índices de sedimentabilidade, sendo classificado, segundo VON SPERLING (1997), como ruim.

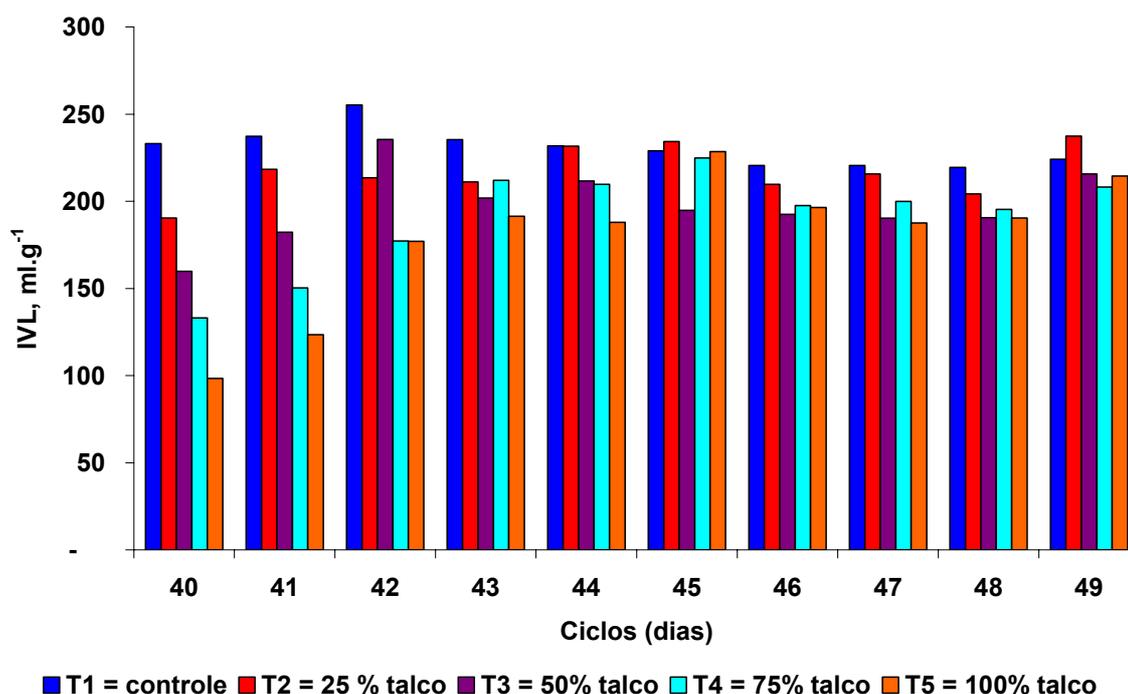


Figura 4.18 – Índice volumétrico do lodo (IVL) *versus* ciclos (dias) na primeira aplicação de talco.

Para os tratamentos nos quais foram utilizadas concentrações crescentes de talco, no primeiro dia após a sua aplicação, houve uma redução do índice volumétrico do lodo (IVL) diretamente proporcional à dosagem de talco no tanque de aeração, obtendo-se valores do IVL de 190, 160 e 133 ml.g^{-1} para os

tratamentos T2, T3 e T4, respectivamente, estando estes classificados como de média sedimentabilidade. Já para o tratamento T5, obteve-se uma sedimentabilidade boa, alcançando o valor de 98 ml.g^{-1} do IVL.

Na Figura 4.18, pode-se observar que, apenas primeiro dia após a adição de talco, os melhores resultados de sedimentabilidade foram obtidos nos tratamentos T4 e T5, nos quais foram aplicadas concentrações de 75% e 100% de talco sobre a concentração de SSTTA do lodo em comparação com os demais tratamentos.

Devido à não linearidade dos resultados do IVL em relação ao tempo, não foi possível fazer o ajuste de equações de regressão para descrever o comportamento deste índice em função dos ciclos nos cinco tratamentos. Dessa forma, pôde-se verificar que o efeito do talco sobre o IVL, quando operado na manutenção de SSTTA constante, não foi inversamente proporcional à quantidade de talco aplicada ao longo do tempo.

Percebe-se claramente que, apenas até o segundo dia de experimento, o efeito do talco foi eficiente na redução do IVL. Afinal, na medida que foram realizados os descartes de lodo, com objetivo de se manter a concentração de sólidos constantes no reator biológico, o efeito do talco foi reduzindo, indicando, além do efeito de sua dosagem, que a concentração em relação à biomassa presente no reator biológico influencia significativamente na sedimentabilidade do lodo. Deve-se considerar, sobretudo, que uma fração considerável do talco foi retirado juntamente com o descarte do lodo, diminuindo, assim, seu poder de agente lastrante.

A concentração de SSTTA nos experimentos em que foram aplicadas as maiores dosagens de talco manteve-se, apenas durante o primeiro dia de tratamento, em valores muito altos (Figura 4.19). Valores máximos de 7.352 mg.l^{-1} e 6.352 mg.l^{-1} foram observados nos tratamentos T5 e T4, respectivamente.

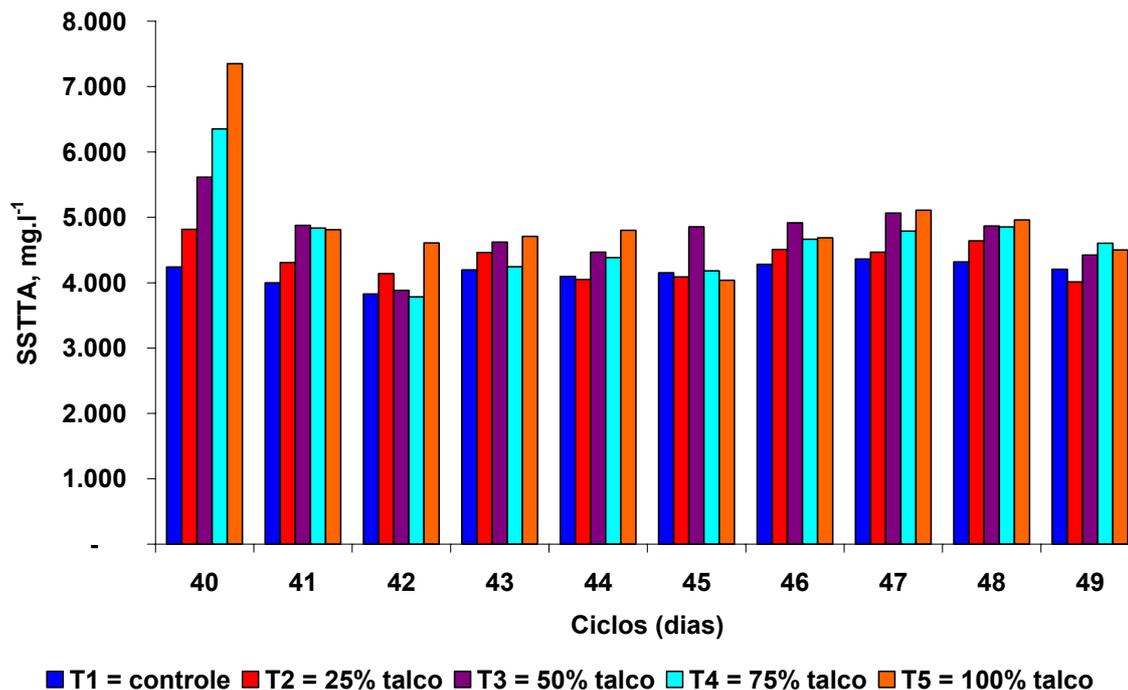


Figura 4.19 – Média de duas repetições diárias da concentração de sólidos suspensos totais (SSTTA) na primeira aplicação de talco.

Após o primeiro dia, todos os tratamentos mantiveram-se na mesma concentração de SSTTA, em média de 4.500 mg.l^{-1} , ou seja, houve um controle efetivo da concentração de sólidos no sistema de tratamento.

De uma maneira geral, verifica-se o curto efeito do talco na melhoria da sedimentabilidade sobre o sistema de tratamento, sendo que seria necessário, na prática, após dois dias, realizar uma nova aplicação. Sendo assim, optou-se por uma nova adição de talco para controlar o *bulking* filamentoso.

Segunda aplicação de talco

Na segunda aplicação de talco (Figura 4.20), os valores de IVL para o tratamento controle (T1), sofreram uma ligeira queda, devido a um decréscimo ocasionado pelo arraste de sólidos no decantador secundário. No entanto, os valores de IVL permaneceram relativamente altos, na faixa de 187 ml.g^{-1} a 255 ml.g^{-1} , caracterizando um lodo de sedimentabilidade que variou de média e ruim, respectivamente.

Nos demais tratamentos, nos quais foram adicionadas concentrações crescentes de talco no reator biológico, obteve-se melhor redução de IVL em comparação com o efeito do talco no primeiro dia de aplicação da etapa anterior. Os valores para o IVL no primeiro dia da segunda aplicação de talco foram de 196 ml.g⁻¹ e 148 ml.g⁻¹ para os tratamentos T2 e T3, respectivamente. Já para os tratamentos com maior concentração de talco, houve uma melhora substancial em relação à redução do IVL, sendo encontrados os valores de 98 ml.g⁻¹ e 89 ml.g⁻¹ para os tratamentos T4 e T5, respectivamente. Ressalta-se que VON SPERLING (1997) classifica esses valores de IVL como sendo de boa sedimentabilidade.

Conforme observado na primeira aplicação, verificou-se o efeito curto do talco na redução do IVL quando é feito o controle de sólidos sobre o sistema de tratamento por meio dos SSTTA's constantes. Como já discutido, isso aconteceu, porque, na medida que foram realizados os descartes de lodo (para manter a concentração de sólidos constantes no reator biológico), o efeito do talco foi reduzindo, mostrando, além do efeito de sua dosagem, que a concentração em relação à biomassa presente no reator biológico influencia significativamente na sedimentabilidade do lodo.

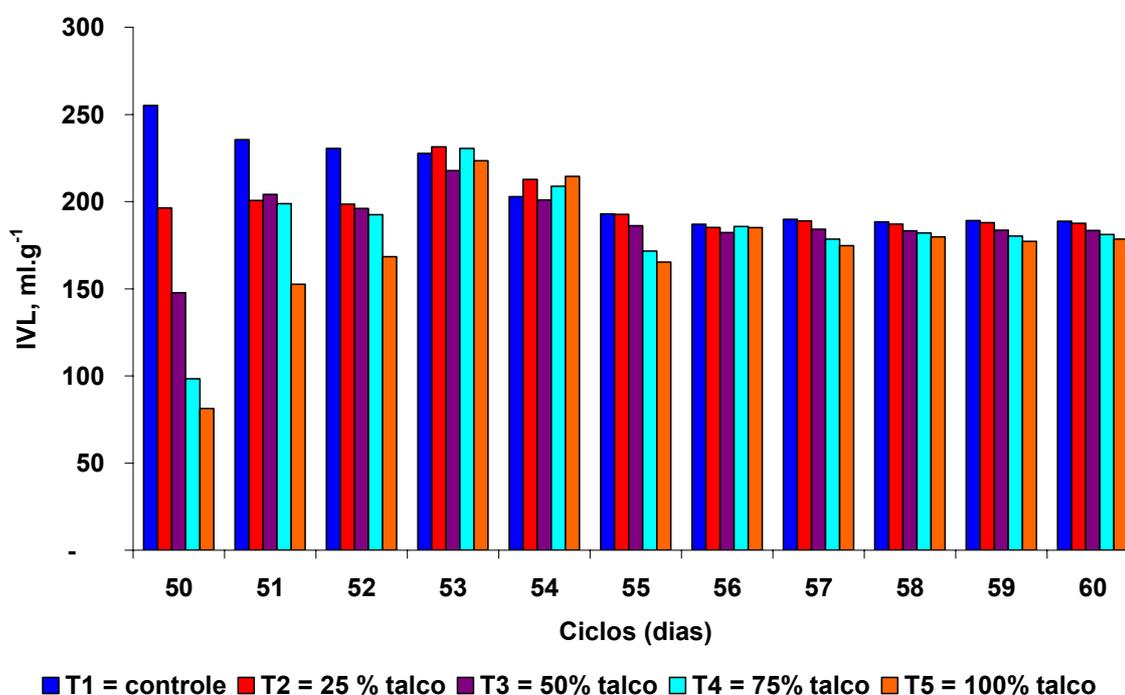


Figura 4.20 – Índice volumétrico do lodo (IVL) versus ciclos (dias) na segunda aplicação de talco.

Nos demais ciclos de tratamento, o IVL apresentou valores similares nos cinco tratamentos, ficando comprovado que o efeito do talco só é significativo na redução do IVL em dosagens e concentrações altas, pois permitem uma maior ação de seu potencial como agente lastrante.

A concentração de SSTTA nos experimentos em que foram aplicadas as maiores dosagens de talco manteve-se apenas durante o primeiro dia de tratamento em valores muito altos (Figura 4.21). Valores máximos de 9.892 mg.l⁻¹ e 8.500 mg.l⁻¹ foram observados nos tratamentos T5 e T4, respectivamente.

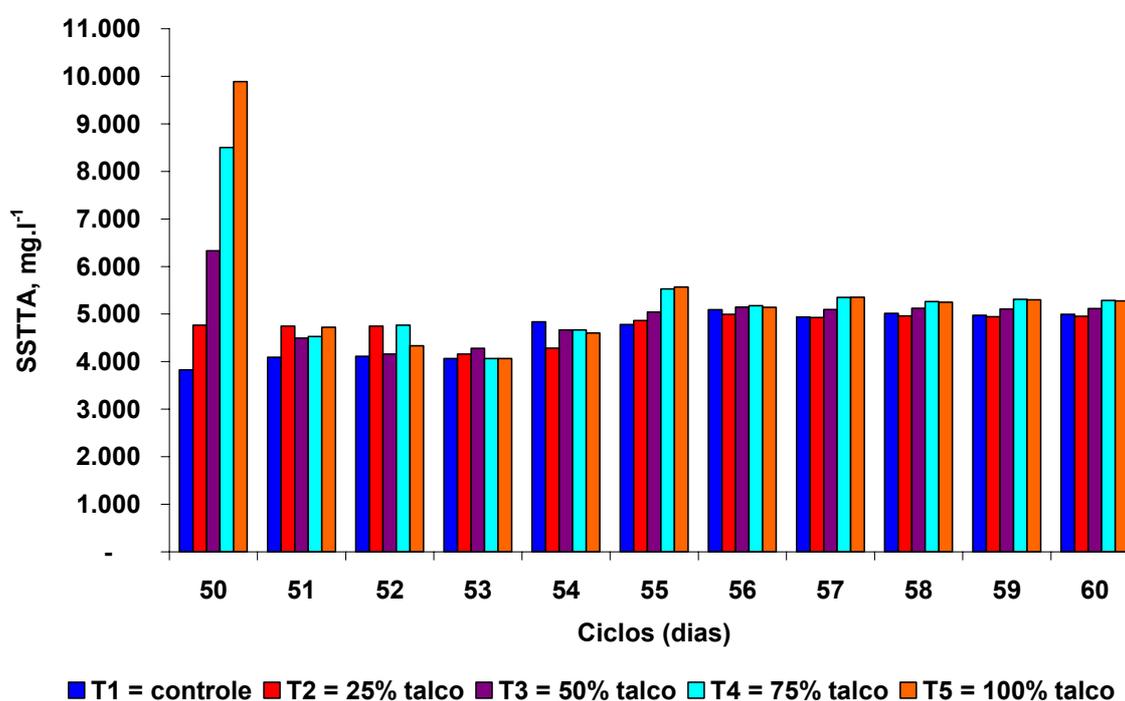


Figura 4.21 – Média de duas repetições diárias da concentração de sólidos suspensos totais (SSTTA) durante a primeira aplicação de talco.

Pode-se verificar que, após o primeiro dia, todos os tratamentos mantiveram-se na mesma concentração de SSTTA, em média de 4.500 mg.l⁻¹, indicando um controle efetivo da concentração de sólidos no sistema de tratamento. (Figura 4.21).

De uma maneira geral, verifica-se o curto efeito do talco na melhoria da sedimentabilidade sobre o sistema de tratamento. Foi, então, necessário, após um dia, realizar uma nova aplicação. Sendo assim, constatou-se que o controle

de sólidos realizado sobre o sistema de tratamento foi pouco efetivo na manutenção do efeito do talco na redução do *bulking* filamentoso.

4.2.2.2. Análise qualitativa do IVL

Para avaliar qualitativamente o efeito de adições sucessivas de talco sobre o sistema biológico quanto à melhoria de sedimentabilidade do lodo, a variância das médias de IVL obtidas em cada tratamento foi analisada e está reunida no quadro de ANOVA (Quadro 4.14).

De acordo com os resultados mostrados no Quadro 4.14, existe pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos, estatisticamente diferente de zero, a 1% de probabilidade. Assim, as médias dos tratamentos foram comparadas duas a duas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados médios de IVL obtidos para os tratamentos em cada uma das etapas estão no Quadro 4.15.

Quadro 4.14 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos onde foram feitas aplicações sucessivas de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	5854,4428	9,28*
Aplicações	1	4324,0250	6,86
Tratamentos x Aplicações	4	300,9598	0,48
Resíduo	95	630,7342	
Total	104		
CV (%)		12,79	

*significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.15 –. Comparação entre médias gerais de IVL de cada tratamento e aplicação nos conjuntos experimentais em que foram feitas adições sucessivas de talco no reator biológico

Aplicação	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	231	217	197	191	180
2	208	197	188	184	174
Média Geral**	219a	207ab	192bc	187bc	177c

**Média geral de IVL seguidas por uma mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Analisando o conjunto de dados médios do IVL, pode-se verificar que o tratamento controle (T1), no qual não foi aplicado talco, apresentou o maior valor médio geral do IVL, caracterizando um lodo de sedimentabilidade ruim, fato este que confirma que, estatisticamente, a adição de talco acarreta significativas melhorias na sedimentabilidade do lodo.

Já para os tratamentos em que foram adicionadas dosagens crescentes de talco em relação aos sólidos suspensos totais no tanque de aeração (SSTTA), percebe-se que existe uma diferença estatisticamente significativa de sedimentabilidade em relação à dosagem aplicada nos reatores. Os valores médios gerais do IVL são inversamente proporcionais à dosagem de talco aplicada, embora estas diferenças não tenham sido em ordem de grandeza muito expressivas.

Nos tratamentos em que foram aplicados talco, T2, T3, T4 e T5 foram verificadas reduções nos valores do IVL, de 5,4%, 12,3%, 14,6% e 19,2% em comparação ao tratamento controle, respectivamente. No entanto, analisando o valor absoluto deste índice, pode-se afirmar que tais melhorias quanto à sedimentabilidade não são significativas para o sistema biológico de tratamento de efluente, ficando fora do ideal.

Diante disso, pode-se afirmar que a adição de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante no reator biológico, foi menos efetiva no controle do intumescimento filamentoso quando comparado ao sistema operado com a idade do lodo constante (θ_c).

4.2.2.3. Análises microscópicas e composição biológica do lodo

De acordo com a escala de concentração de bactérias filamentosos proposta por JENKINS *et al.* (2003), nesta segunda fase, assim como na primeira, observou-se uma presença abundante da bactéria TIPO 021N (Figura 4.22).

A observação da ocorrência da mesma espécie de microrganismo causador do intumescimento filamentoso da primeira para a segunda fase é um indicativo da manutenção das características do efluente, bem como das condições em que os sistemas de tratamento biológico operavam.

Os mecanismos de agregação entre os flocos biológicos e as partículas de talco foram os mesmos verificados na FASE 1, assim, optou-se por não ilustrar novamente tais interações.



Figura 4.22 – Microfotografia de contraste de fase de uma amostra fresca do lodo biológico, evidenciando a concentração excessiva de bactérias filamentosas, durante a Fase 2 deste experimento (100x).

Nas Figuras 4.23 e 4.24, estão representadas as composições do lodo biológico, correlacionando a porcentagem de sólidos suspensos fixos no tanque de aeração (SSFTA) e sólidos suspensos voláteis (SSVTA). A fração volátil dos sólidos suspensos representa a fração orgânica (biomassa).

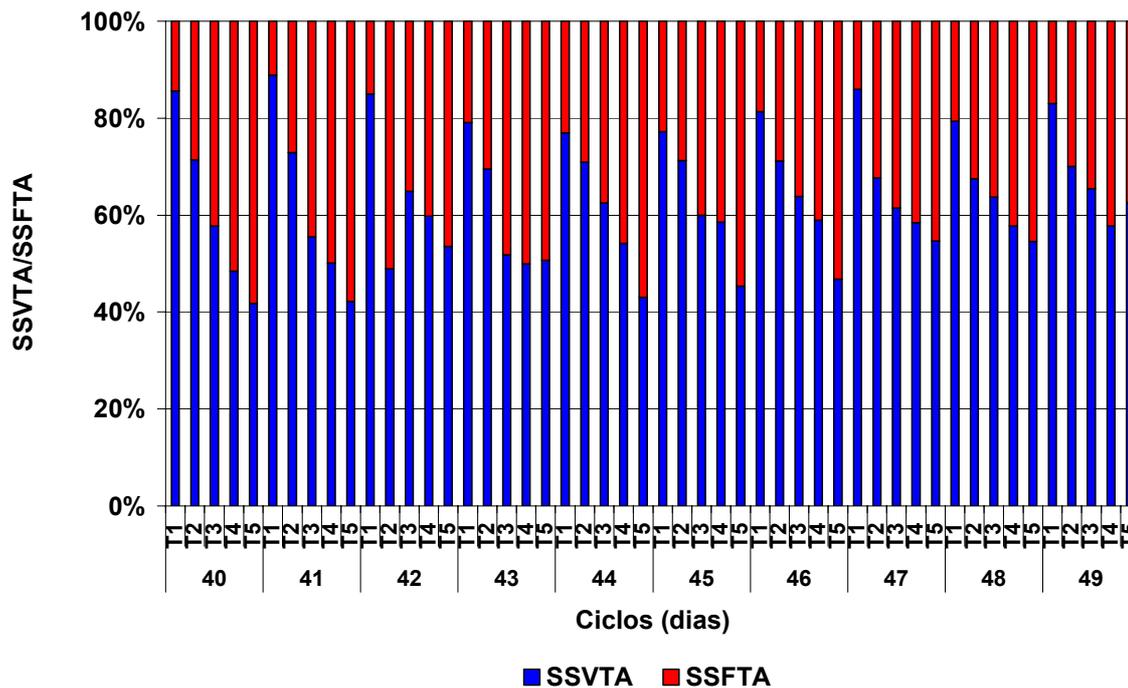


Figura 4.23 – Composição do lodo biológico para a primeira aplicação de talco, relacionando à proporção de SSFTA e SSVTA para os cinco tratamentos.

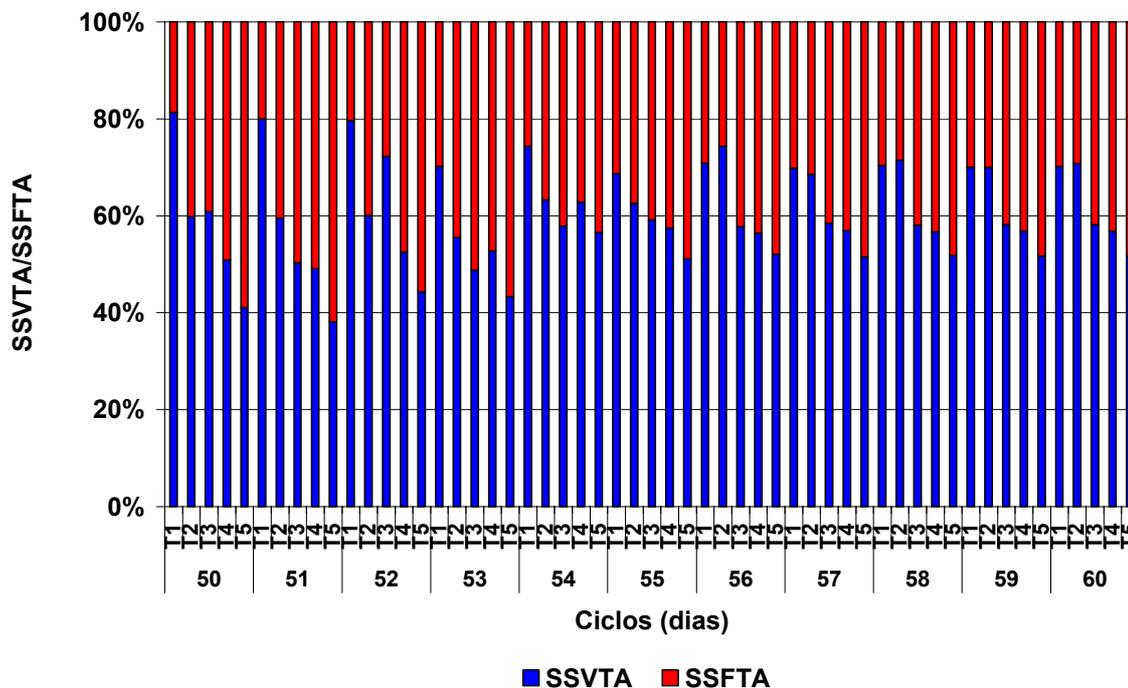


Figura 4.24 – Composição do lodo biológico para a segunda aplicação de talco, relacionando à proporção de SSFTA e SSVTA para os cinco tratamentos.

Para o tratamento controle (T1), verifica-se que, na composição do lodo biológico, a proporção SSVTA/SSFTA se manteve superior a 70% durante as duas etapas de aplicação de talco, indicando, com isso, uma maior concentração de biomassa em relação ao material inerte. Estes valores estão entre 70 e 85% de SSVTA/SSFTA, reportados por METCALF e EDDY (2003).

Proporcionalmente em relação à concentração de talco aplicada sobre o sistema biológico de tratamento, há um acúmulo de talco nos reatores biológicos, mudando consideravelmente a composição do lodo, chegando a valores de 40 e 35% de SSVTA/SSFTA para os tratamentos T4 e T5, nos quais foram aplicadas as maiores dosagens.

Pode-se observar que, com o passar dos ciclos de tratamento biológico, a proporção de material inerte (SSFTA) diminui, devido ao descarte da biomassa realizado para o controle de sólidos constante no tanque de aeração. Mesmo tendo essa diminuição da proporção inerte, verifica-se o acúmulo desse material (talco), que passa a fazer parte da composição da biomassa.

4.2.2.4. Avaliação da eficiência do sistema de tratamento

Com o objetivo de avaliar qualitativamente o efeito de adições sucessivas de talco sobre o sistema biológico, as variâncias das médias de SSVTA obtidas em cada tratamento e aplicação de talco foram analisadas e reunidas no quadro de ANOVA (Quadro 4.16 e 4.18).

De acordo com os resultados mostrados nos Quadros 4.16 e 4.18, verifica-se que existe pelo menos um contraste, estatisticamente diferente de zero, entre as médias dos tratamentos em cada uma das aplicações, a 1% de probabilidade. Assim, as médias de SSVTA dos tratamentos foram comparadas duas a duas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados médios de SSVTA, obtidos para os tratamentos em cada uma das duas aplicações de talco estão nos Quadros 4.17 e 4.19.

Quadro 4.16 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos da primeira aplicação de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	1486376,48	14,61 *
Resíduo	45	101728,64	
Total	49		
CV (%)		11,16	

*significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.17 – Comparação entre médias de SSVTA, expressos em mg.l⁻¹, em cada tratamento para a primeira aplicação de talco da Fase 2

Tratamentos	Médias Ordenadas **
T1	3426a
T2	2966b
T3	2881b
T4	2572bc
T5	2436c

**Média de SSTTA seguidas por uma mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 4.18 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos da segunda aplicação de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	1302333,57	10,00 *
Resíduo	50	130244,44	
Total	54		
CV (%)		12,45	

*significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

Quadro 4.19 – Comparação entre médias de SSVTA, expressos em mg.l^{-1} , em cada tratamento para a segunda aplicação de talco da Fase 2

Tratamentos	Médias Ordenadas **
T1	3361a
T2	3104ab
T3	2787bc
T4	2778bc
T5	2462c

**Média de SSTTA seguidas por uma mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Nas Figuras 4.25 e 4.26, encontram-se a evolução da distribuição da concentração de biomassa expressa pelos sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA), durante as duas aplicações de talco.

Observa-se que, para o tratamento controle (T1), os valores de SSVTA sempre permaneceram superiores a 3.000 mg.l^{-1} .

Para os demais tratamentos, T2, T3 T4 e T5, foram observados valores mínimos de SSVTA de 2.735, 2.140, 2.200 e 1.780 mg.l^{-1} , respectivamente. Representa, com isso, uma menor concentração de biomassa no reator biológico devido ao descarte do lodo, com objetivo de manter a concentração de SSTTA constante, pois, além de remover uma grande parcela de talco, há também uma perda da biomassa junto com o lodo de descarte.

De acordo com VON SPERLING (1997), os valores típicos de SSVTA para sistemas de tratamento por lodos ativados de aeração prolongada, como utilizado neste estudo, variam entre 2.500 a 4.000 mg.l^{-1} . Sistemas de aeração prolongada possuem grande concentração de SSVTA, ou seja, maior disponibilidade de biomassa para assimilar o substrato do efluente, tendo, assim, maior eficiência na remoção de carga orgânica (DQO) se comparado a outros sistemas de tratamento biológico.

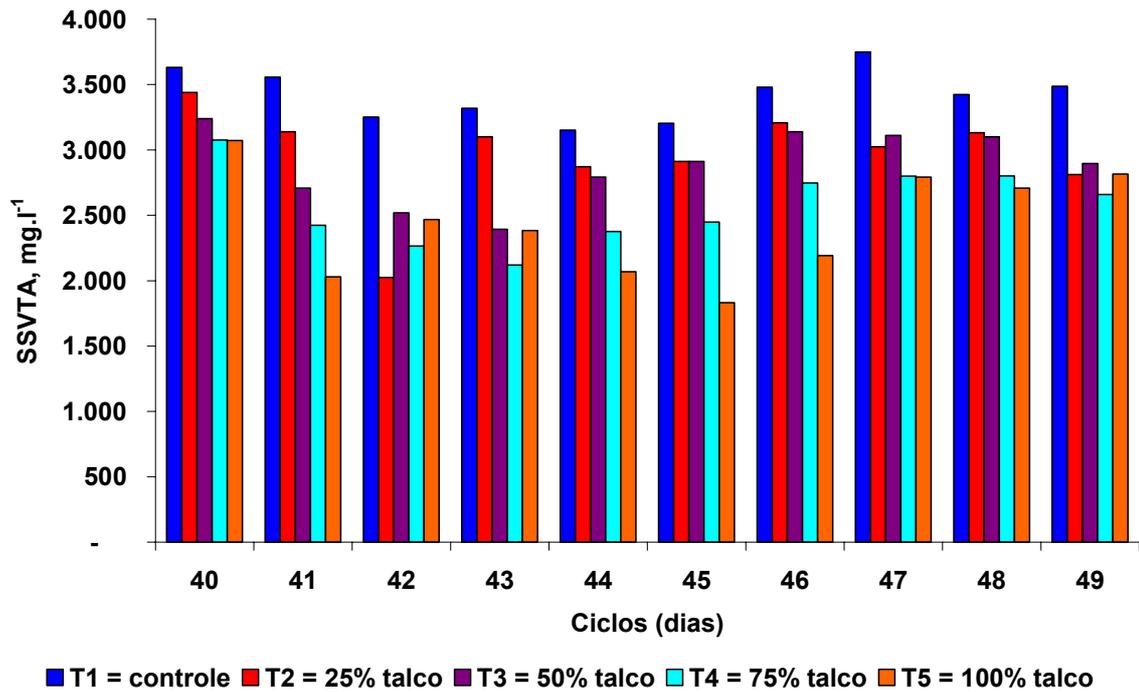


Figura 4.25 – Média de duas repetições diárias da concentração de biomassa expressa por SSVTA durante a primeira de aplicação do talco.

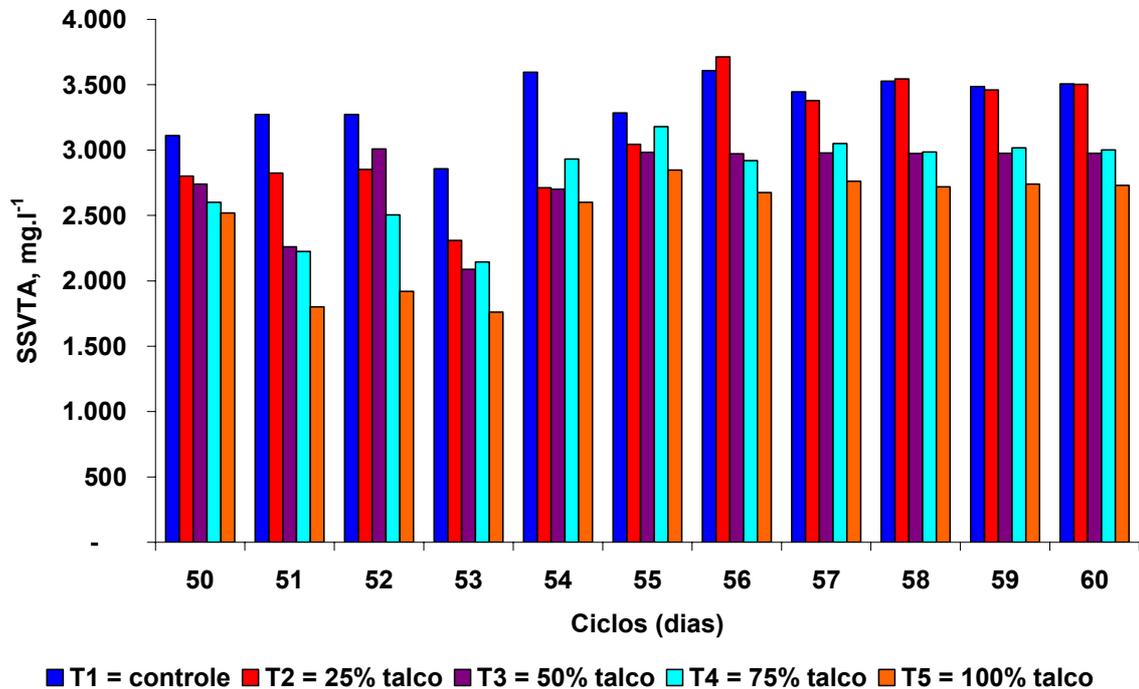


Figura 4.26 – Média de duas repetições diárias da concentração de biomassa expressa por SSVTA durante a segunda de aplicação do talco.

A constatação da variação da concentração de biomassa é um indicativo de que o sistema biológico foi afetado devido ao grande volume de descarte de lodo, que influenciou o crescimento bacteriano e a eficiência de remoção de matéria orgânica em termos de DQO.

Para avaliar o efeito da influência da utilização do talco sobre o sistema operando com controle de sólidos por meio do SSTTA constante na atividade biológica e, por conseguinte, na remoção de matéria orgânica, foi aplicado o teste da análise de variância (ANOVA) sobre os valores médios de eficiência de remoção de DQO nos tratamentos e em cada uma das duas aplicações de talco (Quadro 4.20).

Quadro 4.20 – Resumo da análise de variância (ANOVA) para os tratamentos nos quais foram feitas duas aplicações sucessivas de talco no reator biológico

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calculado
Tratamentos	4	62,6330	9,80*
Aplicações	1	21,4204	3,35
Tratamentos x Aplicações	4	0,8053	0,13
Resíduo	95	6,3899	
Total	104		
CV (%)		2,70	

*significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; CV = Coeficiente de Variação.

De acordo com os resultados mostrados no Quadro 4.20, existe pelo menos um contraste entre as médias dos tratamentos, estatisticamente diferente de zero, a 1% de probabilidade. Assim, as médias dos tratamentos foram comparadas duas a duas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados médios de eficiência de remoção de DQO, obtidos para os tratamentos em cada uma das duas aplicações de talco estão no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 – Comparação entre médias gerais de eficiência de remoção de DQO em cada tratamento e aplicações sucessivas de talco nos conjuntos experimentais

Aplicações	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	96,5	94,5	93,7	93,4	91,4
2	95,2	93,9	92,9	92,1	91,0
Média Geral**	95,8a	94,2ab	93,3bc	92,7bc	91,2c

**Média geral de IVL seguidas por uma mesma letra não diferem entre si em nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Analisando o conjunto de dados médios de remoção de DQO (Quadro 4.21), pode-se verificar que houve diferenças estatisticamente significativa quanto à remoção de matéria orgânica nos tratamentos estudados.

O tratamento controle (T1), comparado aos demais tratamentos em que foram adicionadas dosagens crescentes de talco (T2, T3, T4 e T5), apresentou uma diminuição da eficiência de remoção de DQO, sobretudo devido ao maior descarte de lodo, necessário para manutenção de SSTTA, que acarretou grandes perdas nas concentrações de biomassa juntamente com o lodo de descarte. Assim, a remoção de matéria orgânica nos sistemas de tratamento biológico foi influenciada negativamente.

O conjunto experimental formado pelos tratamentos T3, T4 e T5, apresentou as menores eficiências de remoção de DQO, sendo estes considerados estatisticamente iguais a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Apesar disso, todos os tratamentos removeram mais que 91,0% da DQO, de modo que o maior valor desse parâmetro, medido para os efluentes tratados, não chegou a 180 mg.l^{-1} . Isto, devido ao tempo de reação de 21 horas, que foi o suficiente para estabelecer um contato prolongado entre a biomassa do lodo com a matéria orgânica do efluente, promovendo altas eficiências de remoção de DQO.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são apresentadas a seguir:

FASE PRELIMINAR – Identificação dos microrganismos causadores do intumescimento do lodo e seleção do melhor talco:

- A bactéria filamentosa Tipo 021N foi encontrada abundantemente em todas as fases de execução do experimento, sendo a responsável por um intumescimento filamentoso bastante agressivo e excessivo do lodo biológico proveniente de uma fábrica de papel reciclado, utilizado neste estudo;

- O talco OD 325 foi o mais efetivo na redução do IVL dentre todos os talcos estudados, sendo que, a partir de 16 horas após sua dosagem, foi verificada estabilização da estrutura do floco biológico.

FASE 1 – Aplicações sucessivas de talco com o controle de sólidos por meio da manutenção da θ_c constante:

- Houve uma redução do IVL inversamente proporcional à dosagem de talco aplicada e, estatisticamente, foi comprovada uma similaridade de comportamento no incremento do IVL em relação ao coeficiente angular, sendo consideradas as curvas de regressão linear paralelas entre si.

- Foi verificado o efeito em curto prazo do talco na melhoria da sedimentabilidade sobre o sistema de tratamento, sendo necessário, após o período de sete a dez dias, uma nova aplicação de talco para controlar o intumescimento filamentoso.

- Melhores desempenhos quanto à sedimentabilidade do lodo foram obtidas nos tratamentos com a maior dosagem de talco em relação aos SSTTA , tendo reduções do IVL em relação ao tratamento controle de 42,7% e 50,5%, para os T4 (75% talco) e T5 (100% talco), respectivamente. Os valores médios gerais do IVL são estatisticamente iguais nestes dois tratamentos.

- Por meio de análises microscópicas e da composição do lodo, verificou-se que as partículas de talco foram incorporadas ao floco biológico, fortalecendo sua estrutura e aumentando o seu peso, sendo, portanto, considerado um agente lastrante. Além disso, foi possível perceber que, após aplicações sucessivas, ocorreu acúmulo de talco nos reatores, que passou a fazer parte da composição da biomassa do tratamento biológico.

- Foi constatado que, durante todos os ciclos, a concentração de biomassa, expressa em termos de SSVTA, permaneceu em torno de 3.000 mg.l^{-1} em todos os tratamentos, indicando que o crescimento bacteriano não foi afetado pela presença de talco.

- Estatisticamente, foi comprovado que, qualitativamente, no tratamento controle (T1), comparado aos demais tratamentos em que foram adicionadas quantidades crescentes de talco (T2, T3, T4 e T5), não houve efeito algum sobre a eficiência de remoção de matéria orgânica em termos de DQO, sendo esta eficiência superior a 94,9% em todos os tratamentos.

FASE 2 – Aplicações sucessivas de talco com controle de sólidos por meio da manutenção de SSTTA constante, foram:

- O efeito do talco só foi significativo no primeiro ciclo após sua aplicação.

- Apesar de obter diferenças estatisticamente significativas nos tratamentos em que foram aplicados talco – T2 (25% talco), T3 (50% talco), T4 (75% talco) e T5 (100% talco) –, foram verificadas melhorias pouco significativas na sedimentabilidade do lodo, obtendo reduções de IVL da ordem de 5,4%, 12,3%, 14,6% e 19,2%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle.

- O conjunto experimental formado pelos tratamentos T3 (50% talco), T4 (75% talco) e T5 (100% talco), apresentou as menores eficiências de remoção de DQO, sendo considerados estatisticamente iguais a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Conclusões gerais:

- Foi constatado o efeito, em curto prazo, de melhorias de sedimentabilidade pelo uso do talco em torno de cinco a sete dias. No entanto, ele apresentou ser um eficiente agente lastrante. Deste modo, ele poderá ser utilizado como medida corretiva, ou seja, de maneira emergencial, em condições severas de intumescimento, evitando a perda da eficiência de tratamento e de clarificação do efluente tratado.

- Verificou-se que, além do talco ser quimicamente inerte, insolúvel e melhorar o balanço hidrofobicidade/hidrofilicidade, ele não afeta a eficiência do tratamento, o que prova sua compatibilidade com a biomassa.

- Além do efeito da dosagem do talco, sua concentração em relação à biomassa presente no reator biológico influencia significativamente a sedimentabilidade do lodo.

- O efeito da adição de talco sobre um sistema de tratamento operando com controle de sólidos por meio da manutenção da concentração de SSTTA constante foi menos efetivo no controle do intumescimento filamentoso quanto comparado ao sistema operando com a idade do lodo constante (θ_c).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIDIOTIS, V., FCIWEM, C. F. F., BALAVOINE, C. W., CARLIELL-MARQUET, C. An examination of the surface characteristics of activated sludge in relation to bulking during the treatment of paper mill wastewater. **Water and environment**. P p 123 – 130. v2. 2006.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – **Standard methods for examination of water and wastewater**. Washington: APHA, AWW, WPCF. 20. ed. 1998.

BIDAUT, A.; CLAUSS, F.; HELAINE, D.; BALAVOINE, C. Floc agglomeration and structuration by a specific talc mineral composition. **Wat. Sci. Tech.** v. 36, n 4, p 57 – 68, 1996.

BIDAUT, A.; CLAUSS, F.; HELAINE, D.; BALAVOINE, C. Improving activated sludge floc structure and aggregation for enhanced setting and thickening performances. **Wat. Sci. Tech.** v. 38, n 8 – 9, p 35-44, 1997.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. Wiley-Liss. Inc. . USA. 478p. 1994.

CAMPOS, J. R. **Alternativas para o tratamento de esgotos – pré-tratamento de águas para abastecimento**. Publicação n.09, Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, Americana, SP. 2002. 125p.

CLAUSS, F.; BALAVOINE, C. HÉLAINE, D.; MARTIN, G. Controlling the setting of activated sludge in pulp and paper wastewater treatment plants. **Wat. Sci. Tech.** v. 40, n 11 – 12, p 223 – 230, 1999.

EIKELBOOM, D. H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation. **Wat. Sci. Tech**, v. 42, n 9, p 119 – 126, 2000.

FUNARBE. **SAEG – Sistema para análises estatísticas – versão 5.0**. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes. 1993. 80p.

GRADY, C. P. L. Jr; DAIGGER, G. T.; LIM, H. C. **Biological wastewater treatment. Second edition, Revised an expanded**. Marcel Dekker Inc. New York: Basel. 1076p. 1999.

GRAJA, S., CLAUSS, F., WILDERER, P. Application of talc to improve settleability of activated aludge. In Proceedings the Development and Application of Waster Technology. **Anais ...1998**.

JENKINS, D.; RICHARD, M. G.; DAIGGER, G. T. **Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming**. 3 ed. Michigan USA: Lewis Publisher, 2003. 190p.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. Metcalf & Eddy, Inc., 4 ed., 2003. 1540p.

MINAS GERAIS. Comissão de Política Ambiental – COPAM. Deliberação Normativa nº46, de 16 de dezembro de 1986. Estabelece as normas e padrões para a qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências. COPAM, **Diário do Executivo de Minas Gerais**, 10/01/1987.

NOLASCO, M.A. Tratamento biológico de efluentes da indústria de celulose e papel por aeração estendida modificada. In: CONGRESSO ANUAL DE

CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 1997., São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1997, p. 465 – 474.

PALM, J. C.; JENKINS, D.; PARKER, D. S. Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in completely-mixed activated sludge process. **Jornal Water Pollution Control Federation**, n. 52, 2484p. 1980.

PIIRTOLA, L., HULTMAN, B., ANDERSSON, C., LUNDEBERG, Y. Activated sludge ballasting in batch tests. **Water Research**, v. 33, 1799 – 1804. 1999 (a).

PIIRTOLA, L., HULTMAN, B., WEÄ N, M. L. Activated sludge ballasting in pilot plant operation. **Water Research**, v. 13, 3026 – 3032. 1999 (b).

RIBEIRO JUNIOR, J. I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: UFV, 2001. 301p.

SCHOLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS System for elementary statistical analysis**. 2 ed., Cary, NC: SAS Inst. Inc., 1997.

SEKA, A. M., DE WIELE, T.V., VERSTRAETE, W. Feasibility of a multi-component additive for efficient control of activated sludge filamentous bulking. **Water Research**,. v. 35.p 2995 – 3003. 2000.

SILVA, C. M. **Princípios básicos de tratamento de efluentes líquidos**. Viçosa – MG: [s.n.], 1999. 25p. Apostila de aula referente à disciplina controle ambiental na indústria de celulose e papel.

SOUZA, C. A. Microbiologia de lodos ativados. **Microfotografia de contraste de fase (100x)**. Diapositivo: color. 2007.

SOUZA, C. A. **Controle do intumescimento filamentoso em um sistema de lodos ativados utilizando seletores biológicos**. 2002. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SPRINGER, A. M. **Industrial environmental control – Pulp and paper industry**. 2. ed. Atlanta: Tappi Press, 1993.

VAN HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado – teoria e aplicações para projetos e operação**. Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. 472p. 1999.

VANDERHASSELT, A.; VERSTRATE, W. Short-term effects of additives on sludge sedimentation characteristics. **Wat. Sci. Tech.** v. 33, n. 2, p 381 – 390, 1999.

VAZOLLER, R. F. **Microbiologia de lodos ativados**. Série Manuais, São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 123p. 1999.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed., Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. v. 1, 243p.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. 1. ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. v. 4, 416p.

VON SPERLING, M. Dimensionamento de lodos ativados por batelada utilizando os princípios da teoria do fluxo de sólidos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 6, n. 3 - jul/set 2001 p 147 – 156. 2001.

XILOLITE S.A. **Informações técnicas: composição físico-química dos talcos**. Código: CQ-T-001. Revisão: 0. Data:26/07/04. Folha: 01/01. 2006.