

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Keila Fernanda Soares Hedlund

**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA: COMPARAÇÃO ENTRE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO**

Santa Maria, RS
2016

Keila Fernanda Soares Hedlund

**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA:
COMPARAÇÃO ENTRE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO**

Dissertação apresentado ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Elvis Carissimi

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Soares Hedlund, Keila Fernanda
ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA:
COMPARAÇÃO ENTRE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO / Keila
Fernanda Soares Hedlund.-2016.
152 p.; 30cm

Orientador: Elvis Carissimi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2016

1. Estação de tratamento de água de São Gabriel 2.
Tratamento de lodo 3. Lodo de ETAs 4. Polímeros 5.
Resíduos I. Carissimi, Elvis II. Título.

Keila Fernanda Soares Hedlund

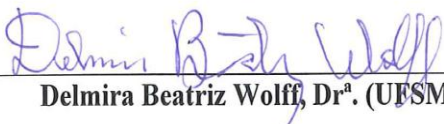
**ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA:
COMPARAÇÃO ENTRE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO**

Dissertação apresentado ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 04 de março de 2016:



Elvis Carissimi, Dr. (UFSM)
(Presidente /Orientador)



Delmira Beatriz Wolff, Dr^a. (UFSM)



Liliana Amaral Féris, Dr^a. (UFRGS)

Santa Maria, RS
2016

*Dedico esta conquista, com carinho e amor,
aos meus pais Valmir e Ivone, e ao
meu esposo Marlon.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por ter abençoado a minha caminhada e pela oportunidade de concluir mais esta etapa da minha vida.

À meus pais, Valmir e Ivone pela força, incentivo a lutar pelos meus ideais, carinho e amor incondicional que me deram durante toda a minha vida e durante meus estudos, sempre fortalecendo e apoiando para continuar nessa jornada.

Ao meu esposo Marlon, por ser um grande companheiro e cúmplice nos momentos de dificuldade e alegria, pelo carinho, pelo amor, pela paciência e por sempre estar ao meu lado me incentivando e me ajudando.

Ao meu orientador Elvis Carissimi pelo apoio, confiança e conhecimento transmitido, pelo suporte e pelos seus incentivos.

Ao João Pedro e Manoel, pela ajuda nas rotinas do laboratório, durante a etapa experimental.

À Samara e Cristiane, pelo companheirismo, apoio e conselhos durante esta jornada.

À Ronaldo pelas considerações e correções no trabalho.

À Gislayne e ao professor Alessandro pela ajuda com a estatística.

À Angélica pela ajuda com as análises laboratoriais.

À São Gabriel Saneamento pela disponibilidade e ótimo atendimento durante as coletas de lodo, e fornecimentos de dados fundamentais para a realização desta pesquisa.

A todos os meus amigos que conquistei durante esta etapa, pela amizade, pelos bons momentos que passamos juntos, pelos conselhos e apoio.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela infraestrutura disponibilizada para a realização das atividades e pelo ensino gratuito e de qualidade.

À CAPES pelo auxílio financeiro, por meio de bolsa de estudo, concedida para a realização deste estudo.

Por fim, a todos que de alguma forma ajudaram, agradeço.

Muito obrigada!!!

*Os jovens se cansarão e se fatigarão, e os moços certamente cairão;
Mas os que esperam no Senhor renovarão as forças, subirão com asas como águias;
correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão (Isaías 40:30-31).*

RESUMO

ADENSAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: COMPARAÇÃO ENTRE SEDIMENTAÇÃO E FLOTAÇÃO

AUTORA: Keila Fernanda Soares Hedlund

ORIENTADOR: Elvis Carissimi

Em estações de tratamento de água (ETAs) ocorre uma geração elevada de resíduos sólidos. Os lodos de ETAs apresentam características próprias, que dependem principalmente da qualidade da água captada, dos produtos químicos utilizados no tratamento e método de limpeza dos decantadores. A caracterização do lodo é feita com ensaios em laboratório antes de empregar qualquer tipo de produto ou método de tratamento nos resíduos. O adensamento constitui umas das fases mais importantes do tratamento do lodo, pois visa a diminuição do volume e máxima concentração de sólidos. Neste trabalho foi avaliado o desempenho do adensamento do lodo de decantadores da ETA de São Gabriel – RS (Brasil), por meio de sedimentação e flotação a ar dissolvido (FAD). Amostras de lodo foram coletadas em duas campanhas de amostragem, sendo este, após caracterizado, utilizado nos ensaios de adensamento. Avaliou-se a utilização de cinco tipos de polímeros (catiônico, aniônico e não-iônico), e aqueles que resultaram em menor turbidez remanescente da água clarificada, após a floculação, foram utilizados nos ensaios de adensamento. Os parâmetros avaliados após o adensamento foram: turbidez remanescente da água clarificada; concentração de sólidos; velocidade de clarificação; e resistência a filtração. Na caracterização quantitativa do lodo foi evidenciada a produção de massa de lodo, por meio de equação empírica, de 11,8 toneladas/mês e de 11,1 toneladas/mês por meio de medição *in loco*. Qualitativamente o lodo apresentou baixa biodegradabilidade, e quanto à classificação segundo a NBR 10.004 de 2004, o lodo foi classificado como resíduo Classe II A – Não Inerte. Nos ensaios de adensamento com diferentes dosagens dos polímeros aniônico e catiônico (muito baixa densidade da carga – MB) nos ensaios de sedimentação, e para a FAD apenas o polímero catiônico – MB. Na comparação dos tratamentos verificou-se que a turbidez remanescente da água clarificada obteve menores valores por meio do tratamento por FAD. As maiores concentrações de sólidos foram encontradas no lodo adensado por sedimentação, para as dosagens de 1,0 e 1,5 mg pol. catiônico - MB/g SST (7,05 e 7,10%) e 0,25 mg pol. aniônico/g SST (7,04%). A velocidade de clarificação do lodo adensado por FAD 50% foi superior aos demais tratamentos, mas não apresentou diferença estática para as distintas dosagens. Nos ensaios de resistência específica do lodo obteve-se menor valor para o tratamento por sedimentação para a dosagem de 4,5 mg pol. catiônico - MB/g SST(9,0E+12 m.kg⁻¹). Conclui-se que a utilização dos polímeros auxiliou no adensamento do lodo, tanto na sedimentação quanto na FAD. Contudo faz-se necessário antes da tomada de decisão na escolha do processo de adensamento, do tipo de polímero e dosagem utilizada, determinar quais serão os processos subsequentes de tratamento do lodo, e quais os parâmetros são mais relevantes dentro da realidade da ETA. Ainda deve-se considerar os custos e a disponibilidade de pessoal qualificado antes de optar pelo emprego do adensamento do lodo por sedimentação ou por FAD.

Palavras-chave: Estação de tratamento de água de São Gabriel. Resíduos. Tratamento de lodo. Polímeros.

ABSTRACT

SLUDGE THICKENING IN WATER TREATMENT PLANT: COMPARISON BETWEEN SEDIMENTATION AND FLOTATION

AUTHOR: Keila Fernanda Soares Hedlund

ADVISOR: Elvis Carissimi

In water treatment plants (WTP) the solid waste generation is considered very high. The sludge from WTP have their own characteristics, which depend mainly on the captured water quality, the chemicals used in the treatment and cleaning method of the settling basins. The sludge characterization is carried out in laboratory tests before using any type of product or method of treatment. The thickening is one of the most important stages of sludge treatment and it aims to decrease the volume and increase the solids concentration. In this work it was evaluated the performance of the sludge thickening of the WTP São Gabriel – RS (Brazil) by sedimentation and flotation with dissolved air (DAF). Sludge samples were collected in two sampling campaigns, which it was characterized and used in the thickening studies. Five different types of polymers (among cationic, anionic and nonionic) were employed, and those which resulted in lower residual turbidity of the clarified water after flocculation, were used in thickening studies. The parameters evaluated after thickening were: remaining turbidity of the clarified water; solids concentration; settling rate (velocity); and resistance to filtration. In the quantitative characterization sludge it was evident in the sludge mass production by means of an empirical equation of 11.8 tons / month and 11.1 tons / month by *in loco* measurement. Qualitatively the sludge had low biodegradability, and it was classified as waste “Class II A - Not Inert”, according to the Brazilian Regulation NBR 10.004 (2004). In the thickening studies with different dosages of cationic and anionic polymers (very low density charge - MB) for the settling tests, and only the cationic polymer-MB showed good results for the DAF. In order to compare settling and flotation thickening processes it was found that the remaining turbidity of the clarified water had lower values by treating by DAF. The higher solids concentrations were found in the sludge thickened by sedimentation, to the dosages of 1.0 and 1.5 mg cationic pol. - MB/g SST (7.05 and 7.10%) and 0.25 mg anion pol./g SST (7.04%). Settling rates of the thickened sludge by DAF 50% was higher than the other treatments, but showed no statistic difference to the different polymer dosages. In particular sludge strength tests gave the lowest value for the treatment by sedimentation for dosage of 4.5 mg pol. cationic - MB / g SST (9.0×10^{12} m.kg⁻¹). In conclusion, the use of polymers aided the sludge thickening both in sedimentation as in the DAF thickening processes. However it is necessary prior to the decision making in choosing the kind of the thickening process, to evaluate the polymer type and dosage, determine what will be the subsequent processes of sludge treatment, and which parameters are most relevant according to the WTP. Yet it must be considered the cost and available staff before opting for the use of sludge thickening by sedimentation or DAF.

Keywords: Water treatment plant in São Gabriel. Residues. Sludge treatment. Polymers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação das tecnologias de tratamento de água.	20
Figura 2 - Fluxograma típico da tecnologia convencional (ciclo completo).	21
Figura 3- Esquema ilustrativo da presença de água no lodo de ETAs.	26
Figura 4 - Gráfico típico dos valores de (t/v) em função de v, para obtenção de b no cálculo de resistência específica.	33
Figura 5 - Córrego Carioca antes e após o lançamento de lodo de decantadores da ETA-Itabirito.	38
Figura 6 - Fluxograma de uma estação convencional (de ciclo completo) com tratamento de lodos.	41
Figura 7 - Esquema ilustrativo da clarificação e adensamento.	45
Figura 8 - Adensador tipo parafuso.	47
Figura 9 - Destinação do lodo dos Municípios Brasileiros em porcentagem.	51
Figura 10 - Localização da área da Estação de Tratamento de Água de São Gabriel.	55
Figura 11 - Estação de Tratamento de Água de São Gabriel.	56
Figura 12- Vista geral de ETA de São Gabriel no com ênfase para os decantadores de fluxo horizontal e para os filtros.	57
Figura 13 - Processo de higienização dos decantadores da ETA de São Gabriel. A - Lodo acumulado em um decantador da ETA. B - Processo de higienização de um dos decantadores da ETA de São Gabriel.	58
Figura 14 - Organograma que descreve a realização das principais etapas da pesquisa. Etapa I - Caracterização quantitativa e qualitativa do lodo da ETA; Etapa II - Classificação do lodo da ETA segundo a NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a); Etapa III - Avaliação das diferentes dosagens e tipos de polímeros em Teste de Jarros; Etapa IV - Ensaio de adensamento do lodo da ETA por sedimentação e flotação a ar dissolvido.	61
Figura 15 - Ensaio em Teste de Jarros com Polímero Catiônico com alta densidade da carga, com variações de dosagens de 5, 4, 3, 2, 1 e 0 mg pol/g SST.	66
Figura 16 - Procedimento esquemático da floculação e adensamento do lodo, realizados em escala de bancada.	69
Figura 17-Imagem ilustrativa do experimento de sedimentação após 360 minutos de ensaio. A - Polímero Catiônico MB, com dosagens em mg pol/g SST. B - Polímero Não-Iônico, com dosagens em mg pol/g SST.	70
Figura 18-Imagem ilustrativa do experimento de sedimentação após 360 minutos de ensaio. A - Polímero Catiônico MB, com dosagens em mg pol/g SST. B - Polímero Aniônico, com dosagens em mg pol/g SST. 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; e 2,0 mg pol/g SST.	71
Figura 19 - Ensaio de adensamento por flotação a ar dissolvido em flotor de bancada, com 4,5 mg pol/g SST de polímero catiônico - MB.	72
Figura 20 - Equipamentos utilizados para determinação da resistência específica. 1) funil de Buchner nº2; 2) bomba a vácuo; 3) cronômetro; 4) medidor de vácuo (manômetro); 5) proveta graduada com dispositivo para a tomada de vácuo; 6) filtro de papel <i>Whatman 42</i> ; 7) anel de borracha vedante para funil Bucner; 8) mangueira para ligar a proveta a bomba; e 9) cadinho de porcelana.	75
Figura 21 - Determinação da viscosidade do filtrado, por meio de viscosímetro de Oswald, em banho de água, visando manter a temperatura constante de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$	77
Figura 22 - Massa de lodo mensal produzida de julho de 2014 a junho de 2015.	80
Figura 23 - Massa mensal de lodo produzida e valor acumulado durante o período de julho de 2014 a junho de 2015.	81

Figura 24 - Tipo e dosagem de polímero relacionado com a turbidez remanescente da água clarificada, nos ensaios em teste de jarros para os polímeros Catiônicos, Aniônico e Não-Iônico, com dosagens que variaram de 0,5 a 6,0 mg pol/g SST, para o lodo da primeira coleta.	88
Figura 25 - Tipo e dosagem de polímero relacionado com a turbidez remanescente da água clarificada, nos ensaios em teste de jarros para os polímeros Catiônico - MB, Aniônico e Não-Iônico, com dosagens que variaram de 0,5 a 5,0 mg pol/g SST, para o lodo da segunda coleta.	89
Figura 26 - Turbidez do clarificado relacionada à dosagem dos polímeros catiônico – MB e não-iônico, nos ensaios preliminares de adensamento sedimentação.	90
Figura 27 - Teor de sólidos totais no lodo adensado relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e não-iônico, nos ensaios preliminares de adensamento sedimentação.....	92
Figura 28 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de Polímero Catiônico MB, para as dosagens de 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 3,5; 4,0; e 4,5 mg pol/g SST.	93
Figura 29 - Curvas da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de Polímero Não-Iônico, para as dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; e 2,0 mg pol/g SST.....	94
Figura 30 - Adensamento por flotação sem a utilização de polímero, com taxa de reciclo de 100%, com indicação para as camadas de lodo sedimentado e flotado.....	95
Figura 31 - Turbidez do clarificado relacionado com as taxas de reciclo (30, 50 e 100%) nos ensaios preliminares de adensamento por flotação.....	95
Figura 32 - Ensaio de adensamento por flotação utilizando Polímero Não-Iônico, com sedimentação de flocos no fundo da célula de flotação.....	97
Figura 33- Turbidez remanescente do clarificado relacionado com as dosagens do polímero Catiônico – MB, nos ensaios preliminares de adensamento por FAD, Tr de 40% e P_{sat} de 6 atm.	98
Figura 34 - Curvas da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico - MB, para as dosagens de 4,5 e 5,0 mg pol/g SST.	99
Figura 35 - Turbidez remanescente do clarificado e teor de sólidos no lodo adensado por FAD, com dosagem de polímero de 4,5 mg pol/g SST, taxa de reciclo de 40% e pressões de saturação de 5,0; 5,5; e 6,0 atm.	100
Figura 36 - Turbidez do clarificado relacionado com a dosagem dos polímeros catiônico – MB (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5) e aniônico (0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5), nos ensaios experimentais de adensamento por sedimentação. .	103
Figura 37 - Teor de sólidos totais no lodo adensado relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e aniônico.....	105
Figura 38 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico - MB, para as dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST.	106
Figura 39 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero aniônico, para as dosagens de 0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5 mg pol/g SST. ...	106
Figura 40 - Velocidade de clarificação do adensamento por sedimentação para os tratamentos com polímero catiônico – MB e aniônico.....	107
Figura 41 - Resistência específica (kg.m^{-1}) resultante do adensamento por sedimentação para os tratamentos com polímero catiônico – MB e aniônico.	108
Figura 42 - Turbidez remanescente do clarificado relacionado com as dosagens do polímero Catiônico – MB, nos ensaios experimentais de adensamento por FAD, Tr de 40% e 50% e P_{sat} de 6 atm.	110

Figura 43- Teor de sólidos totais no lodo adensado por FAD 40% e 50% relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e aniônico.	111
Figura 44 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico – MB e Tr de 40 e 50%, para as dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST.	112
Figura 45 - Velocidade de clarificação do adensamento por FAD com Tr de 40 e 50%, para os tratamentos com polímero catiônico – MB, com dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 e 5,5.	113
Figura 46 - Resistência específica (kg.m^{-1}) resultante do adensamento por FAD 40 e 50% para os tratamentos com polímero catiônico – MB.	114
Figura 47 - Adensamento de lodo por FAD com Tr de 40%, P_{sat} de 6 atm e dosagem de 4,5 mg pol/g SST. A: Lodo com concentração de sólidos de 18.953 mg.L^{-1} . B: Lodo com concentração de sólidos de 25.190 mg.L^{-1} . C: Lodo com concentração de sólidos de 49.550 mg.L^{-1}	114
Figura 48 - Resistência específica (kg.m^{-1}) resultante do adensamento por sedimentação (polímero catiônico – MB e aniônico) e por FAD com Tr de 40 e 50%.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tratamento requerido em função da classificação das águas.....	21
Tabela 2 - Produção de resíduos de acordo com o tipo de manancial.....	27
Tabela 3 - Geração de sólidos produzidos em função do produto químico utilizado.	28
Tabela 4 - Características dos lodos gerados em ETAs.....	30
Tabela 5 - Concentrações de metais para ETAs do estado de São Paulo.....	31
Tabela 6 – Concentração de metais em lodo de ETA da Índia.....	32
Tabela 7 - Propriedades do lodo, com ênfase para a resistência a filtração.	33
Tabela 8 - Parâmetros e métodos analisados na caracterização qualitativa do lodo.	64
Tabela 9 - Características dos diferentes tipos de polímeros sintéticos utilizados.....	65
Tabela 10 - Produção de lodo da ETA de São Gabriel, e dados de turbidez da água bruta e volume mensal tratado, no período de julho de 2014 a junho de 2015.....	80
Tabela 11 - Características físico-químicas e microbiológicas do lodo das amostras coletadas em agosto/2015 (Amostra 1) e novembro/2015 (Amostra 2).	82
Tabela 12 - Características físico-químicas do lodo utilizado nos ensaios em teste de jarros e adensamento da segunda campanha, em 25 de novembro/2015 (Amostra 1), 28 de dezembro/2015 (Amostra 2) e 27 de janeiro de 2015 (Amostra 3).....	84
Tabela 13 - Resultados dos parâmetros analisados, nos extratos lixiviados e solubilizados e valores especificados na NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a).....	85
Tabela 14 - Turbidez remanescente da água clarificada nos ensaios em Teste de Jarros, relacionada com as dosagens e tipo de polímeros utilizados, para as amostras coletas em agosto/2016 (Amostra 1) e novembro/2016 (Amostra 2).	87
Tabela 15 - Teor de sólidos totais no lodo adensado por sedimentação para diferentes dosagens de polímero catiônico – MB e não-iônico, e porcentagem ST em relação a STV e STF.	91
Tabela 16 - Densidade e viscosidade dos polímeros Catiônicos, Aniônico e Não-Ioniônico.	96
Tabela 17 - Teor de sólidos no lodo adensado por FAD (P _{sat} de 6 atm) para diferentes dosagem de polímero Catiônico – MB, e porcentagem de ST em relação a STV e STF.	99
Tabela 18 - Teor de sólidos no lodo adensado por sedimentação para diferentes dosagens de polímero catiônico – MB e aniônico, e porcentagem ST em relação a STV e STF.....	104
Tabela 19 - Teor de sólidos no lodo adensado por FAD (P _{sat} de 6 atm) para diferentes dosagens de polímero Catiônico – MB, e porcentagem de ST em relação a STV e STF.	111
Tabela 20 - Turbidez remanescente da água clarificada resultante do adensamento por FAD com Tr de 40%, P _{sat} de 6 atm e dosagem de 4,5 mg pol/g SST, paralodo com diferentes concentrações de sólidos.	115
Tabela 21 - Valores médios (erro padrão) da turbidez da água clarificada (NTU), teor de sólidos (%) e velocidade de clarificação – V _{cl} (m.kg ⁻¹), para os ensaios de adensamento por sedimentação (polímero catiônico e aniônico) e por FAD com Tr de 40 e 50%.	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWWA - American Water Work Association

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CCO - Centro de controle operacional

ETA - Estação de tratamento de água

ETR - Estações de tratamento de resíduos

FAD - Flotação por ar dissolvido

OD - Oxigênio dissolvido

PAC - Cloreto de polialumínio

P_{sat} - Pressão de saturação

pH - Potencial hidrogeniônico

RETA - Resíduos das estações de tratamento de água

SDT - Sólidos dissolvidos totais

SSF - Sólidos em suspensão fixos

SST - Sólidos em suspensão

SSV - Sólidos em suspensão voláteis

ST - Sólidos totais

STF - Sólidos totais fixos

STV - Sólidos totais voláteis

Tr - Taxa de reciclo

Vcl - Velocidade de clarificação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	19
3.2 RESÍDUOS DAS ETAS.....	22
3.2.1 Origem do lodo gerado em ETAs	25
3.2.2 Características dos lodos das ETAs	26
3.2.3 Impactos ambientais e toxicidade dos lodos de ETAs	37
3.2.4 Tratamento de lodos de ETAs	39
3.2.4.1 Adensamento.....	42
3.2.4.2 Desidratação/Desaguamento	48
3.2.4.3 Disposição final e alternativas de formas de tratamento do lodo de ETAs	50
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	55
5 MATERIAL E MÉTODOS	61
5.1 ETAPA I - CARACTERIZAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA DE SÃO GABRIEL.....	61
5.1.1 Fase I - Caracterização Quantitativa	62
5.1.2 Fase II – Caracterização Qualitativa	63
5.2 ETAPA II - CLASSIFICAÇÃO DOS LODOS DA ETA SEGUNDO A NBR 10.004/04.....	64
5.3 ETAPA III – ENSAIOS EM TESTE DE JARROS PARA AVALIAÇÃO DOS POLÍMEROS	65
5.4 ETAPA IV - ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO	67
5.4.1 Fase I: Adensamento por sedimentação	69
5.4.1 Fase II: Adensamento por flotação por ar dissolvido (FAD)	72
5.4.2.1 Avaliação da concentração de sólidos no processo de adensamento por FAD.....	74
5.4.3 Curva e velocidade de Clarificação/Adensamento por Sedimentação e FAD	74
5.4.4 Resistência Específica	75
5.4.5 Comparação entre o adensamento por sedimentação e por FAD	77
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
6.1 ETAPA I - CARACTERIZAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA DE SÃO GABRIEL.....	79
6.1.1 Fase I - Caracterização quantitativa	79
6.1.2 Fase II – Caracterização qualitativa do lodo	82
6.2 ETAPA II –CLASSIFICAÇÃO DOS LODOS DA ETA DE SÃO GABRIEL SEGUNDO A NBR 10.004/04	84
6.3 ETAPA III – ENSAIOS EM TESTE DE JARROS PARA AVALIAÇÃO DOS POLÍMEROS	86
6.4 ETAPA IV - ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO	89
6.4.1 Ensaios preliminares de adensamento como o lodo da ETA de São Gabriel, RS ...	90
6.4.1.1 Adensamento por Sedimentação com lodo da primeira coleta	90
6.4.1.2 Adensamento por flotação a ar dissolvido (FAD) com lodo da primeira coleta	94
6.4.1.3 Síntese dos resultados do adensamento do lodo da primeira coleta.....	101
6.4.2 Ensaios experimentais adensamento com o lodo da ETA de São Gabriel, RS	102
6.4.2.1 Ensaios de Adensamento por Sedimentação com lodo da segunda coleta	102
6.4.2.2 Ensaios adensamento por FAD com lodo da segunda coleta	108
6.4.3 Comparação entre o adensamento por sedimentação e por FAD	115
7 CONCLUSÃO	121
8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123

REFERÊNCIAS	125
APÊNDICE A – TURBIDEZ REMANESCENTE DA ÁGUA CLARIFICADA NOS ENSAIOS DE PRELIMINARES ADENSAMENTO.	133
APÊNDICE B – ANÁLISE DA SÉRIE DE SÓLIDOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES DE ADENSAMENTO POR FAD.	135
APÊNDICE C – TURBIDEZ REMANESCENTE DA ÁGUA CLARIFICADA NOS ENSAIOS DE EXPERIMENTAIS ADENSAMENTO.....	137
APÊNDICE D - CURVAS MÉDIAS DOS ENSAIOS DE CLARIFICAÇÃO	139
APÊNDICE E – VELOCIDADE DE CLARIFICAÇÃO (Vcl) NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ADENSAMENTO.	147
APÊNDICE F – RESISTÊNCIA A FILTRAÇÃO (R) NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ADENSAMENTO.	148
APÊNDICE G – TEOR DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (SST) E PORCENTAGEM DE SST EM RELAÇÃO A SSV E SSF.	149
ANEXO A –CLASSIFICAÇÃO DO LODO SEGUNDO A NBR 10.004 DE 2004 (ABNT 2004a).....	151

1 INTRODUÇÃO

No abastecimento público de água por meio de mananciais superficiais, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) desempenham papel primordial para atingir os padrões de potabilidade. A Portaria nº 2.914, de 2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) estabelece que toda a água destinada para o consumo humano deve ser biologicamente e quimicamente segura para o consumo humano, além de ser esteticamente agradável.

Assim, as ETAs desenvolvem a função de indústrias produtoras de água, representadas principalmente pelas ETAs de ciclo completo, as quais são compostas pelas seguintes processos e operações: captação da água em manancial superficial (água bruta); coagulação; floculação; decantação ou flotação; filtração; desinfecção e fluoretação. Como qualquer indústria as ETAs também produzem resíduos, resultantes do processo de potabilização realizado na água bruta, acarretando a geração de uma quantidade elevada de resíduos, como subprodutos do processo.

Devido ao incremento populacional ocasionado nos últimos séculos, a demanda por água potável elevou-se proporcionalmente, o que exige maior volume de água tratada pelas ETAs. Concomitante, a deterioração dos mananciais devido à poluição e contaminação dos recursos hídricos é cada vez maior. Estes fatores contribuem significativamente para o aumento da geração de lodo, devido a elevada presença de sólidos em suspensão na água bruta e maior uso de produtos químicos no processo de clarificação.

Os coagulantes utilizados no tratamento da água geralmente são sais de alumínio e de ferro (utilizados nas etapas de coagulação e floculação), responsáveis pela formação de flocos, os quais serão removidos nas unidades subsequentes. Deste modo, a geração de lodo nas ETAs de ciclo completo ocorre de maneira mais representativa nas unidades de decantação (ou flotação) e filtração, os quais devem ser tratados e dispostos corretamente.

A principal característica dos lodos de ETAs é serem compostos basicamente de água e sólidos em suspensão, com umidade geralmente maior que 95%. Contudo as características físico-químicas dos lodos variam muito, principalmente por fatores relacionados à qualidade da água bruta, dosagem e produtos químicos utilizados e forma de limpeza dos decantadores.

Mesmo com as maiores exigências legais, ainda são realizadas práticas inadequadas de descarte de resíduos em córregos e rios. Contudo deve-se considerar que a crescente preocupação com a qualidade ambiental é fomento para a mudança deste quadro, com a utilização de técnicas de tratamento do lodo gerado. O descarte de lodo em cursos d'água

acarreta grandes prejuízos para o ecossistema como assoreamento, deterioração da qualidade da água e mortandade de peixes, além de ser potencialmente tóxicos, aos seres humanos, organismos aquáticos e plantas, por isso se faz necessário seu tratamento e disposição adequada.

A primeira etapa do tratamento dos resíduos das estações de tratamento de água (RETA) é o adensamento do lodo, o qual é realizado na maioria das vezes por sedimentação (gravidade) ou flotação a ar dissolvido, para posterior desidratação e disposição final. O método utilizado no tratamento dos RETAs deve ser analisado individualmente, realizando estudos e ensaios de tratabilidade, pois os lodos apresentam características próprias que dependem de cada ETA e não devem ser generalizadas.

O adensamento consiste na concentração dos sólidos do lodo, visando a máxima remoção de água possível, sendo necessário para melhorar o desempenho subsequente dos sistemas de tratamento empregados. A utilização de polímeros nos processos de adensamento é de fundamental importância, pois além de aumentando a concentração sólidos e clarificar a água, facilita a posterior desidratação do lodo. Sendo, a investigação do tipo e dosagem de polímero necessária para se obter resultados otimizados do processo. Muitos experimentos relatam a experiência com polímeros para o adensamento de lodo, contudo existem poucos estudos que visam adequar o tipo de polímero e dosagem adequada nessa fase do tratamento, visando otimizar o processo de adensamento do lodo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho do adensamento de lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Gabriel – RS, avaliando comparativamente os processos de sedimentação e flotação a ar dissolvido (FAD).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- Quantificar a geração global de lodo da ETA de São Gabriel – RS, por meio de equação empírica e medição *in loco*;
- Avaliar as características qualitativas dos resíduos gerados na ETA de São Gabriel, sob ponto de vista físico-químico e microbiológico;
- Classificar o resíduo da ETA segundo a NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004a);
- Investigar o processo de floculação do lodo e clarificação do sobrenadante, por teste de jarros, utilizando diferentes tipos e dosagem de polímeros;
- Avaliar o desempenho do adensamento do lodo da ETA em escala de bancada, utilizando diferentes tipos e dosagens de polímeros nos tratamentos por sedimentação e FAD;
- Analisar as condições operacionais da FAD (Taxa de Reciclo e Pressão de Saturação) e o adensamento por FAD para lodo com diferentes concentrações de sólidos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo está contida a fundamentação teórica, base para a realização deste trabalho. Sendo abordados assuntos sobre o processo de tratamento da água e a geração de resíduos nas ETAs. Ressaltando a origem e características dos lodos, assim como os impactos ambientais e toxicidade acarretados pelo descarte inadequado destes resíduos nos mananciais superficiais. Quanto ao tratamento dos lodos destacam-se as técnicas de adensamento e desaguamento, assim como a disposição final e formas alternativas de tratamento.

3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Impactos sobre os sistemas hídricos podem ser causados pela deterioração dos recursos naturais, afetando diretamente a qualidade da água utilizada para o abastecimento humano. Neste sentido, pesquisas relacionadas à utilização de fontes alternativas e ao avanço de técnicas de tratamento d'água vêm sendo desenvolvidas, buscando eficiência e melhoria da qualidade da água e dos resíduos gerados nas unidades de tratamento. Entre as alternativas tecnológicas nas estações de tratamento de água destacam-se a melhoria da qualidade da água que é distribuída para a população e a minimização dos resíduos, garantindo menor produção de lodos simultaneamente a qualidade da água (VERRELLI et al., 2010).

Segundo a Portaria nº 2.914, de 2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) toda a água destinada para o consumo deve obedecer aos parâmetros de potabilidade, ou seja, os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Para atingir estes parâmetros são utilizadas diferentes tecnologias de tratamento. A definição dos processos de tratamento da água parte da natureza da qualidade da água captado no manancial superficial (água bruta) e da qualidade da água desejada, em um processo que vise a remoção ou redução de determinados constituintes impróprios para a água de abastecimento.

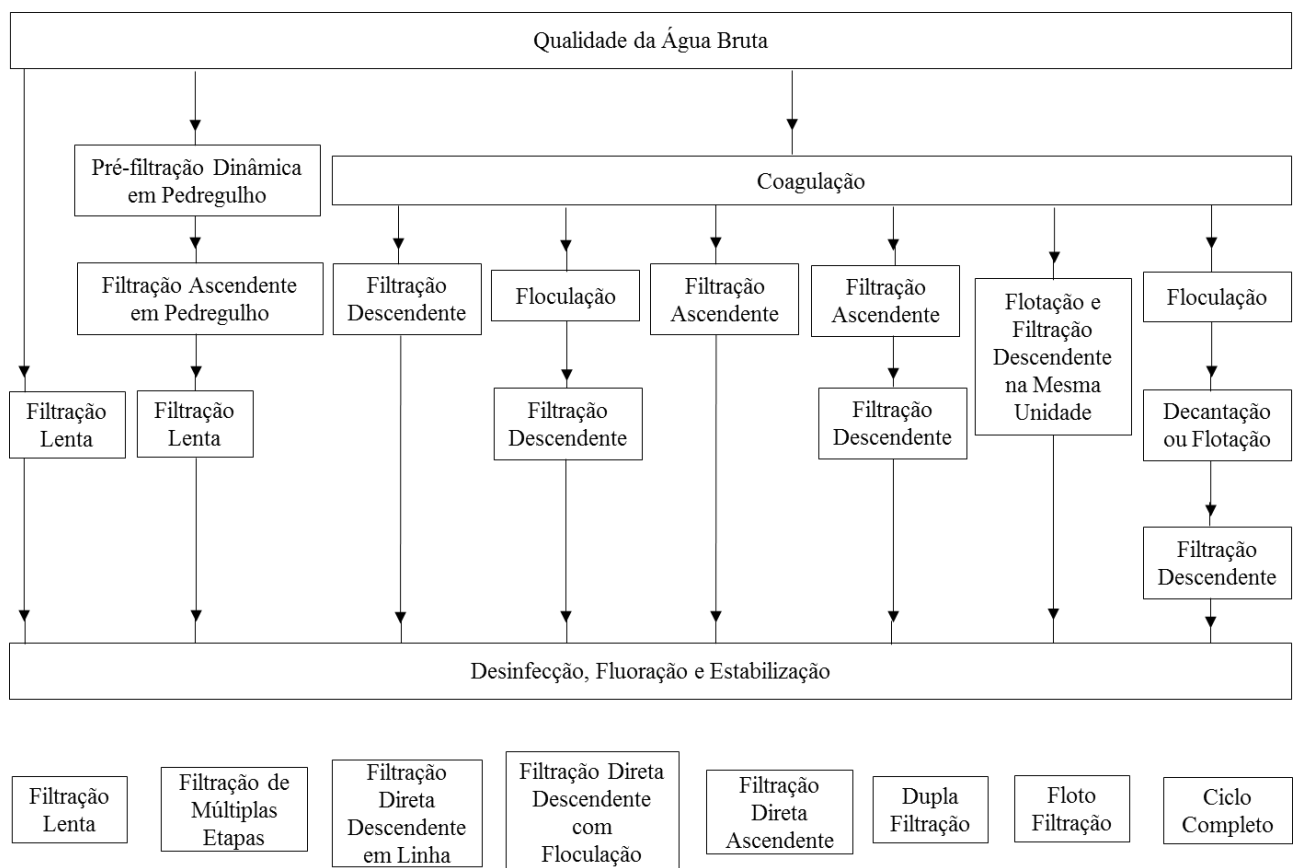
As ETAs desempenham papel importante para atingir os padrões de potabilidade, pois os serviços públicos devem oferecer água de boa qualidade à população atendida, fazendo-se necessário o tratamento da água bruta. O tratamento da água bruta visa à proteção contra micro-organismos, remoção de matéria orgânica e substâncias tóxicas, qualidade estética e proteção da rede de distribuição contra corrosão e contaminação (BONTON et al., 2012).

De acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), além da qualidade da água bruta e da qualidade final da água tratada outros fatores devem ser analisados para determinar a

escolha da tecnologia de tratamento da água, tais como: tipos de resíduos gerados na ETA; condição socioeconômica e posição geográfica da comunidade; capacidade da estação; disponibilidade de recurso; pessoal qualificado para a construção, operação e manutenção; disponibilidade de material de construção e de produtos químicos; menor custo benefício.

Os processos de tratamentos podem ser divididos em dois grupos, aqueles com coagulação química e os sem coagulação química (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Na figura 1 são apresentadas as tecnologias comumente utilizadas no tratamento de águas superficiais.

Figura 1 - Classificação das tecnologias de tratamento de água.



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011).

Para se definir as tecnologias de tratamento deve-se realizar uma série de estudos, mas com o intuito de padronizar a definição das técnicas de tratamento o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define por meio da Resolução 357 de 2005, o tratamento requerido conforme a classificação da água bruta. Na tabela 1 estão representadas as classes e

o nível de tratamento requerido, águas de Classe 4 não são destinadas ao abastecimento público, com usos menos nobres.

Tabela 1 - Tratamento requerido em função da classificação das águas.

Classificação	Tratamento Requerido
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento Simplificado
Classe 2	Tratamento Convencional
Classe 3	Tratamento Convencional
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes

Fonte: CONAMA 357 (2005).

Nas estações de tratamento de água ocorre a predominância do tratamento convencional (também denominado de ciclo completo), composto pelos processos de: coagulação; floculação; decantação; filtração; e desinfecção (Figura 2), podendo existir algumas variações entre as estações, como a substituição da etapa de sedimentação pela flotação, ou o tipo de filtração utilizada.

Figura 2 - Fluxograma típico da tecnologia convencional (ciclo completo).



A água bruta utilizada no tratamento convencional apresenta impurezas acumuladas, tanto material mineral como orgânico, apresentando partículas de diferentes tamanhos (suspensão, estado coloidal e solução) (RICHTER, 2009). Deste modo, se faz necessário a utilização de coagulantes (como sais de ferro e alumínio) e polímeros, para a redução ou remoção de tais impurezas, a limites aceitáveis pelos padrões de potabilidade. Também deve-se considerar que as impurezas presentes na água (partículas coloidais, substâncias húmicas e micro-organismos), apresentando-se estáveis no meio líquido, para que possam ser removidas

é preciso alterar algumas características da água e, conseqüentemente, das impurezas, por meio da coagulação, floculação, sedimentação (ou flotação) e filtração (CENTURIONE FILHO e DI BERNARDO, 2000).

Deste modo, o processo de potabilização da água, em uma ETA, acarreta a geração de resíduos provenientes das impurezas presentes na água bruta. Existem diferentes configurações de sistema de tratamento de água, e conseqüentemente são gerados resíduos/lodos com distintas características. O sistema convencional gera lodo bastante diluído, sendo necessário a remoção da água antes de sua destinação final (REALI, 1999).

3.2 RESÍDUOS DAS ETAS

A partir da transformação da água bruta em água potável, por meio dos processos e operações unitárias, ocorre a geração dos resíduos das estações de tratamento de água (ETA). Os resíduos de ETAs podem ser amplamente divididos em quatro categorias distintas (AWWA, 1997):

- Primeira: Resíduos gerados a partir da coagulação, filtração e oxidação da água visando a remoção de turbidez, cor, micro-organismos, algas, compostos orgânicos, ferro e manganês. Estas unidades de tratamento geralmente usam como coagulante sais de ferro e alumínio. Os resíduos geralmente são lodos produzidos na unidade de sedimentação (flotação) e na lavagem dos filtros.
- Segunda: Resíduos provenientes das unidades de abrandamento. Onde ocorrer a adição de cal, hidróxido de sódio e/ou carbonato de sódio.
- Terceira: Resíduos gerados especificamente visando a remoção de substâncias inorgânicas presente na água bruta (tal como nitrato, fluoreto, rádio e arsênio), por meio de processos de membrana como osmose reversa.
- Quarta: Resíduos gerados a partir de tratamentos que visem a remoção de compostos voláteis da água bruta.

Destas categorias a primeira é objeto de estudo do presente trabalho, resíduos resultantes do processo convencional de tratamento água. Tradicionalmente as ETAs sempre visaram à produção de água com qualidade, para atingir os padrões de potabilidade, dispensando maiores preocupações com os resíduos gerados. Relativamente dando pouca atenção ao tratamento de lodos gerados nas ETAs (ZHAO, 2004a).

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) os lodos de ETAs são classificados como resíduos sólidos, deste modo, devem estar consonância com a Política Nacional de

Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) não sendo permitindo seu lançamento *in natura* em corpos d'água, pois infringe o Artigo 47 da Lei 12.305/2010. Mas mesmo com as exigências legais, práticas inadequadas de descarte de resíduos em córregos e rios, acabam sendo realizadas.

Contudo deve-se considerar que a crescente preocupação com a qualidade ambiental é fomento para a mudança deste quadro, com implementação de técnicas de tratamento para o lodo gerado. Dentre outras, visando a diminuição dos custos para eliminação dos resíduos e dos impactos ambientais (VERRELLI et al., 2010). É importante salientar que estudos referentes a implementação de técnicas de tratamento de RETAs datam desde a década de 90 (CORDEIRO, 1999), contudo discussões sobre o descarte adequado de lodos vem ganhando maior destaque no presente milênio (FERREIRA e VIANNA, 2013).

Os lodos de ETAs são de difícil manejo e disposição, sendo que no Brasil ainda à carência de estudos sobre o tratamento de lodos, deste modo as soluções para a adequada gestão deste tipo de resíduo dificilmente são implementadas, deve-se considerar a iniciativa de novas estações de tratamento de água, mas estas também acabam negligenciando a gestão dos lodos (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2013).

De acordo com Richter (2001) os lodos de ETAs são resíduos compostos de água e sólidos em suspensão, acrescidos de produtos utilizados no tratamento de água. Além de serem classificados como resíduos sólidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Neste sentido para evitar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, os resíduos precisam ser caracterizados segundo parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Para isto as normas NBR 10.004 (ABNT, 2004a), NBR 10.005 (ABNT, 2004b), NBR 10.006 (ABNT, 2004c) e NBR 10.007 (ABNT, 2004d) são utilizadas na classificação dos resíduos.

A Norma NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004a) tem como objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. A presente norma classifica os resíduos em:

- Resíduos classe I – Perigosos: que apresentam periculosidade, com características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade.
- Resíduos classe II A – Não perigosos e Não Inerte: que não se enquadram nas classificações de resíduos perigosos ou inertes. Podendo apresentar as propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos classe II B – Não perigoso e Inertes: que submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006/04 (ABNT, 2004c), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, exceto os aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) a classificação dos resíduos deve envolver a identificação do processo ou atividade que deu origem aos resíduos, e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

Para determinar se os resíduos pertencem a classe I (perigosos) são realizados ensaios de lixiviação, os resultados obtidos para cada parâmetro analisado devem ser comparados com os limites máximos estabelecidos no Anexo F da NBR 10.0004 (ABNT, 2004a) para os extratos lixiviados. Caso os resíduos não apresentem as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, estes pertencem a Classe II (não perigosos).

A partir dos dados obtidos no ensaio de solubilização (de acordo com a NBR 10.006), o lodo é classificado em classe II A (não inertes) e classe II B (inertes). Os resultados obtidos a partir do ensaio devem ser comparados com os limites máximos de extrato solubilizado, estabelecidos no Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), caso nenhum dos constituintes solubilizados apresentem concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos aspectos, cor, turbidez, dureza e sabor (conforme Anexo G citado) o lodo deve ser enquadrado em classe II B. Contudo se as concentrações destes constituintes superarem os padrões estabelecidos o lodo deve ser enquadrado na classe II A, como resíduo não inerte.

Estudos realizados por diversos autores para classificar os lodos gerados em ETAs segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) (RIBEIRO 2007, GUERRA e ANGELIS 2005, FONTANA, 2004) mostram que estes resíduos pertencem à Classe II A, ou seja, não perigosos e não inerte. Devido principalmente as elevadas concentrações de Ferro, Alumínio e Manganês presente no lodo, evidenciando que estes resíduos podem causar danos ao meio ambiente quando não tratados e dispostos indevidamente.

Para controlar o descarte inadequado de lodo de ETAs em corpos hídricos, exigindo o seu tratamento, diversas outras leis são utilizadas como instrumentos, trazendo conteúdos que devem exigir postura adequada das ETAs diante dos resíduos gerados e sua disposição no meio ambiente. Dentre estas pode-se citar: a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 da Política Nacional do Meio Ambiente, que visa controlar o lançamento de poluentes, dentro das

condições e limites estipulados; a Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos, que considera a água um bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico, devendo ser assegurado à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados. A mesma Lei, ainda afirma que o lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos, tratados ou não, em corpos d'água, está sujeita à outorga do Poder Público; a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, sobre Crimes Ambientais, que afirma que o lançamento de resíduos em corpos hídricos, quando não aprovado por órgão ambiental, pode ser considerado crime ambiental, pois acarreta efeitos adversos a fauna aquática do corpo hídrico receptor; e a Lei nº 11.445, de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, prevendo em seu artigo 44 o licenciamento ambiental de unidades de tratamento de lodo, com detalhamento da forma de disposição final dos resíduos.

3.2.1 Origem do lodo gerado em ETAs

A geração de resíduos nas estações de tratamento de água ocorre de forma mais representativa nas unidades de decantação (ou flotação) e filtração, estes resíduos são denominados lodos de ETAs. Contudo deve-se salientar que há geração de lodo na limpeza de outras unidades, apesar de sua pequena contribuição. Entre outras, estas unidades abrangem câmaras de floculação, pré-oxidação, de adsorção e pós-desinfecção (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

O lodo proveniente das unidades de tratamento de água, retidos em sua maioria nos tanques de decantação (ou flotação) e de filtração, é originado no processo de coagulação/floculação, ou seja, nas unidades formadoras de flocos. Na coagulação da água são adicionados sais de alumínio e/ou de ferro, visando a formação de aglomerados que serão removidos nas unidades posteriores.

Do lodo gerado nas ETAs 60 a 95% de sólidos são acumulados nas unidades de decantação (flotação), o restante fica retido nos filtros (RICHTER, 2001). Deste modo, pode-se afirmar que em termos de geração de sólido, a maior parcela se deve aos decantadores, contudo em termos volumétricos a maior parcela de lodo se deve a lavagem dos filtros, devido sua limpeza diária.

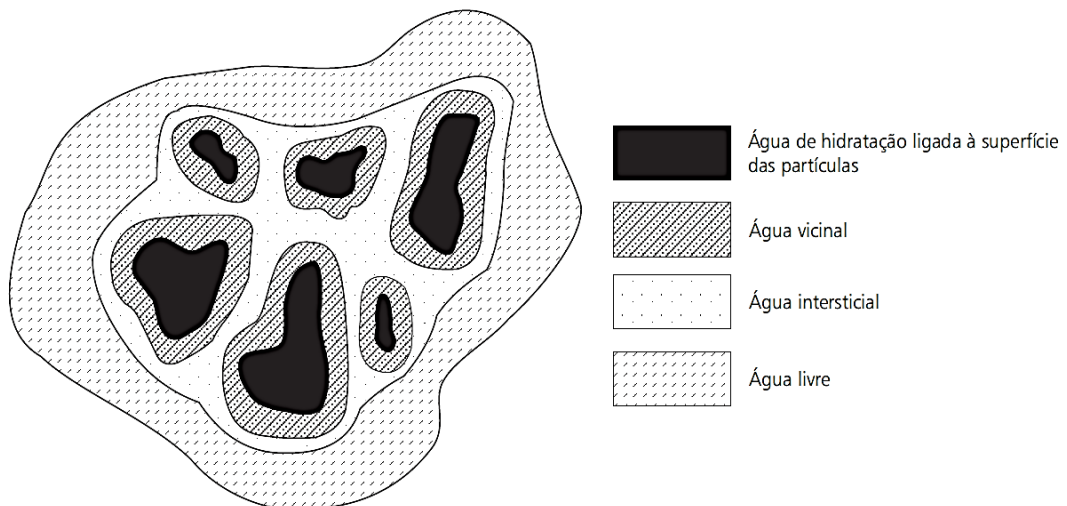
A concentração de sólidos no lodo removido depende de vários fatores, entre os quais pode-se citar o método de limpeza dos decantadores. A concentração de sólidos em suspensão (SST) na remoção mecanizada varia de 5 a 20 g.L⁻¹, enquanto nas descargas hidráulicas este

valor varia entre 2 a 10 g.L⁻¹ (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011). Já segundo os autores, a concentração de SST na água resultante da lavagem dos filtros varia entre 100 e 500 mg.L⁻¹. Porém segundo Richter (2001) os sólidos totais (ST) presente nos tanques de decantação variam entre 1.000 a 40.000 mg.L⁻¹ (0,1 a 4%) e na água de lavagem dos filtros este valor é de 40 a 1.000 mg.L⁻¹ (0,004 a 0,1%) (RICHTER, 2001).

3.2.2 Características dos lodos das ETAs

Os resíduos gerados nas ETAs apresentam como principal característica ser formados basicamente de água e sólidos em suspensão. Estes resíduos possuem grande umidade, geralmente maior que 95%, de maneira geral, sob a forma fluída (CORDEIRO, 1999). A água presente no lodo apresenta diversas frações, como ilustrado na figura 3, a qual influencia a separação da fase líquida da sólida, deve-se salientar que destas frações apenas a água livre é mais facilmente removida do lodo (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

Figura 3- Esquema ilustrativo da presença de água no lodo de ETAs.



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).

Os lodos também podem apresentar comumente areia, argila, metais, soluções dissolvidas e bactérias, acrescido de produtos resultante dos coagulantes aplicados no tratamento da água (FONTANA, 2004). Contudo suas características podem ser alteradas dependendo de alguns fatores, deste modo, salienta-se a importância em analisar as

características dos lodos gerados nas ETAs de forma individualizada, para assim solucionar a problemática do descarte inadequado.

As características diferenciadas dos resíduos gerados nas ETAs podem variar principalmente em função da qualidade da água bruta, da dosagem e produtos químicos utilizados e forma de limpeza dos decantadores. Ou seja, dependem primordialmente das características dos corpos d'água e dos insumos utilizados no tratamento da água. A tabela 2 apresenta os valores típicos da quantidade de lodo gerado em função da qualidade da água bruta e da vazão diária água tratada.

Tabela 2 - Produção de resíduos de acordo com o tipo de manancial.

Tipo de Manancial	Faixa de Produção de Resíduos (g de Sólidos Secos por m³ de Água Tratada)
Água de reservatório com boa qualidade	12 – 18
Água de reservatório com média qualidade	18 – 30
Água de rios com qualidade média	24 – 36
Água de reservatório com qualidade ruim	30 – 42
Água de rios com qualidade ruim	30 – 42

Fonte: Reali, 1999.

Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011) listam uma série de outros fatores que podem interferir na qualidade e quantidade dos resíduos produzidos em uma ETA, abrangendo a: qualidade da água bruta; tecnologia de tratamento; característica da coagulação (como tipo de dosagem de coagulante/alcalinizante/acidificante); uso, características e dosagem do auxiliar de coagulação; uso de oxidante; uso de carvão ativado pulverizado; método de limpeza dos decantadores (ou flotadores); método de lavagem dos filtros; habilidade dos operadores; automação dos processos de operação da ETA; e reuso da água recuperada no sistema de tratamento. As características do lodo produzido também são afetadas pela sazonalidade da qualidade da água que os mananciais podem apresentar, como por exemplo o aumento da turbidez em períodos de maiores precipitações, o eleva a quantidade de lodo produzido.

Como mencionado, um fator que influencia significativamente no volume de lodo gerado é a qualidade da operação dos decantadores e tipo de decantador. Dependendo da forma de limpeza utilizada nos decantadores os resíduos gerados podem ficar retidos alguns dias ou horas, antes de serem descartados, isso altera a concentração de sólidos presente nos

lodos. Decantadores retangulares convencionais, desprovidos de removedores mecânicos de sedimento, acumulam maiores quantidades de lodo até sua limpeza, favorecendo condições anaeróbias na massa de lodo acumulado, acarretando impactos nas características do lodo como a dissolução de metais (REALI, 1999). Complementando Yuzhu (1996) afirma que o lodo do decantador é caracterizado como sendo um fluido não Newtoniano, apresentando-se no estado de gel quando em repouso, mas torna-se relativamente fluido quando agitado.

A lavagem dos filtros também pode interferir diretamente na quantidade de lodo gerada. Quando esta operação é realizada de modo ineficiente, pode-se observar a redução das carreiras de filtração, transpasse de impurezas, diminuição da vida útil do meio filtrante e formação de bolas de lodo (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN 2011).

Ressalta-se que o tipo de coagulante influencia nas características de lodo produzido, a tabela 3 apresenta a relação de lodo produzido pelo produto químico utilizado. A utilização de sais de alumínio ou de ferro gera lodo com altas concentrações destes metais. Em trabalho realizado por Verrelli et al. (2010) foi evidenciado que o tipo e dosagem de coagulante, e o pH de coagulação influenciam diretamente na produção e desidratação de lodos. Corroborando Zhao (2004a) afirma que lodos de alumínio apresentam dificuldade na desidratação.

Tabela 3 - Geração de sólidos produzidos em função do produto químico utilizado.

Produto Químico	g de Sólidos Produzidos por g de Produto Químico
Sulfato de alumínio	0,26 como Al(OH)_3^*
Cloreto férrico	0,66 como Fe(OH)_3^*
Polímero	1,0
Cal	Permite 0,1 como fração insolúvel
Carvão ativado em pó	1,0

Fonte: Adaptado Reali, 1999.

*Dependendo da forma de hidratação do sulfato de alumínio ou cloreto férrico.

A determinação das características do lodo gerado nas ETAs são essências para obtenção de parâmetros de projetos de Estações de Tratamento de Resíduos (ETR). A características e propriedades diferenciadas e usualmente desconhecidas dos resíduos dificultam a tratabilidade e destinação final do lodo (ACHON, BARROSO e CORDEIRO,

2013), por isso elas devem ser analisadas individualmente, de forma descentralizada, uma vez que cada ETA apresenta lodo com características singulares.

a) Características Qualitativas do lodo de ETA

Conhecer as características do lodo é fundamental para definir os métodos de tratamento e disposição final do lodo. Dentre as características qualitativas vários parâmetros físico-químico e microbiológicos podem ser analisados, dentre estes destaca-se: série de sólidos (totais e em suspensão), turbidez, pH, alcalinidade indicativos de matéria orgânica (DBO, BQO e carbono orgânico total – COT, sólidos voláteis), índice bacteriológico de interesse sanitário (coliforme totais, termotolerantes, *E. coli*, cistos de Giárdia, oocistos de *Cryptosporidium*, contagem de ovos de helmintos), concentração de íons metálicos (bromo, manganês, chumbo, entre outros), residuais de coagulantes (alumínio e ferro), e concentração de nitrogênio e fósforo (GUIMARÃES, 2007).

A determinação da série de sólidos é o principal parâmetro a ser analisado quando se refere a caracterização dos resíduos tratados, uma vez que os tratamentos realizados nos lodos visam a concentração máxima de sólidos e conseqüentemente diminuição ou remoção da água do lodo. Vale salientar, que a maior parte da matéria presente no resíduo está em suspensão, por isso os valores de sólidos em suspensão totais (SST) tendem a ser próximos dos sólidos totais (ST).

A tabela 4 apresenta um resumo de alguns parâmetros analisados nos lodos de ETA por distintos autores, pode-se perceber que os resultados apresentados em cada parâmetro apresentam grandes variações, evidenciando-se a diversidade das ETAs e a necessidade em solucionar o problema de forma individualizada, não existindo solução definitiva para o tratamento e disposição dos lodos.

Tabela 4 - Características dos lodos gerados em ETAs.

Pesquisador	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SV %ST	SS %ST	Coliformes	<i>E. Coli</i>
Neubauer (1968)	30 a 150	500 a 15.000	6,0 a 7,6	1.100 a 16.000	-	20% a 30%	-	-	-
Sutherland (1969)	100 a 232	669 a 1.100	7,0	4.300 a 14.000	-	25%	80%	-	-
Bugg (1970)	380	1.162 a 15.800	6,5 a 6,7	4.300 a 28.580	-	20%	-	-	-
Albrecht (1972)	30 a 100	500 a 10.000	5,0 a 7,0	3.000 a 15.000	-	20%	75%	-	-
Culp (1974)	40 a 150	340 a 5.000	7,0	-	-	-	-	-	-
Nilsen (1974)	100	2.300	-	10.000	-	30%	-	-	-
Singer (1974)	30 a 300	500 a 5.000	-	-	-	-	-	-	-
Cordeiro (1981)	320	5.150	6,5	81.575	-	20,7%	-	-	-
Vidal (1990)	449	3.487	6,0 a 7,4	21.972	-	15%	-	-	-
Vidal (1990)	173	1.776	6,7 a 7,1	6.300	-	73%	-	-	-
Cordeiro (1993)	-	5.600	6,4	30.275	-	26,3%	-	-	-
Patrizze (1998)	-	-	5,55	6.112	-	19%	-	-	-
Patrizze (1998)	-	-	6,8	6.281	-	-	-	-	-
Barroso e Cordeiro (2001)*	-	4.800	7,2	-	26.520	-	-	-	-
Barroso e Cordeiro (2001)*	-	5.450	7,4	-	15.330	-	-	-	-
Barroso e Cordeiro (2001)*	-	140	8,93	-	775	-	-	-	-
Silveira (2007)* Média Lodo A	60,75	1.201,1	-	12.404	-	-	-	1,6E+09	12.388
Silveira (2007)* Média Lodo B	36,6	2.660,8	-	14.855	-	-	-	9,75E+05	18.255
Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011)*	-	640	7,9	-	22.000	-	-	1,1E+05	16.600

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999); Silveira (2012); Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011).

*resíduos somente de decantadores

Na tabela 5 apresentam-se as concentrações de metais pesados de lodos das ETA de São Carlos e dos decantadores da ETA de Piracicaba (São Paulo), em que se verifica a ocorrência de altas concentração de metais predominantemente na fase sólida do lodo e que variam principalmente em função do coagulante utilizado.

Tabela 5 - Concentrações de metais para ETAs do estado de São Paulo.

Metais (mg.L⁻¹)	ETA 1*	ETA 2*	ETA 3*
Alumínio	3.965	391	325
Bário	-	0,22	0,18
Cádmio	0,14	0,02	0,02
Cálcio	142	-	0,08
Chumbo	2,32	0,20	0,30
Cloreto	-	35	36,3
Cobre	1,47	0,12	0,20
Cromo total	3,82	0,06	0,09
Ferro total	3381	129	166
Ferro solúvel	-	6,14	0,12
Magnésio	27	2,87	1,38
Manganês	1,86	7,80	3,44
Manganês Solúvel	-	4,57	1,00
Mercúrio	-	-	-
Níquel	2,70	0,14	0,12
Potássio	49,97	7,37	7,55
Sódio	311	29,3	63
Zinco	2,13	0,70	0,98

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999).

*Situação para o Estado de São Paulo.

Em trabalho realizado por Nair e Ahammed (2015), também foram encontradas altas concentrações de metais no lodo da ETA estudada na Índia (Tabela 6), principalmente de alumínio devido a unidade utilizar como coagulante o cloreto de polialumínio (PAC).

Tabela 6 – Concentração de metais em lodo de ETA da Índia.

Parâmetros	Concentração (mg.g⁻¹ de lodo seco)
Alumínio	112,47
Ferro	48,33
Cálcio	20,51
Magnésio	10,89
Silício	3,82

Fonte: Nair e Ahammed (2015).

Para se fazer uma avaliação mais completa das propriedades do lodo é fundamental conhecer as características estruturais dos sólidos, como a resistência específica (resistência a filtração). De acordo com Realli (1999) a resistência específica é um parâmetro utilizado para a avaliação da menor ou maior facilidade de remoção de água de lodos.

A resistência específica é determinada pela equação 1, a qual consiste em avaliar a passagem do líquido por meio de uma massa sólida. Para valores mais baixos de resistência específica, mais fácil será a retirada da água do lodo, ou seja, mais fácil o desague, com o aumento da resistência específica os poros entre os flocos tornaram-se menores ocasionando alto impedimento do transporte de água sob pressão (DE SOUZA e SCALIZE, 2013).

Lodos com distintas procedências podem apresentar resistência específica na ordem de 0,1 a 12 x10¹² m.kg⁻¹ (SCALIZE e DI BERNARDO, 1999), mas de acordo com Reali (1999) os resíduos de ETAs podem apresentar valores de resistência específica entre 5 x10¹² a 70 x10¹² m.kg⁻¹. Tornando imprescindível a execução de ensaios experimentais para determinar o método e polímeros mais adequados no tratamento.

$$r = \frac{2 \cdot b \cdot P \cdot A^2}{\mu \cdot C} \quad (1)$$

Em que:

r = resistência específica (cm.g⁻¹);

P = pressão de filtração (g/cm.s²);

A = área filtrante (cm²);

μ = viscosidade do filtrado (g/cm.s);

C = massa de sólido suspenso por unidade de volume filtrado (g.cm⁻³);

b = coeficiente (s.cm⁻⁶), dado pela equação 2.

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\left(\frac{t_2}{v_2}\right) - \left(\frac{t_1}{v_1}\right)}{v_2 - v_1} \quad (2)$$

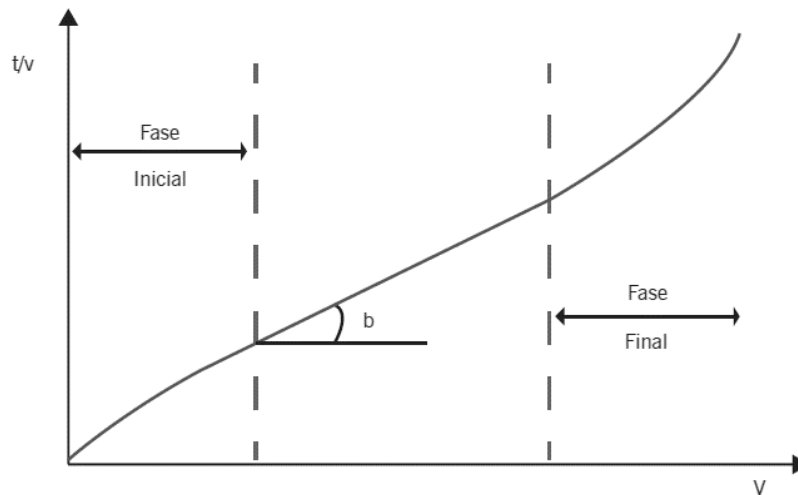
Em que:

t = tempo de filtração (s); e

v = volume do filtrado (cm³).

O valor do coeficiente b é obtido construindo um gráfico no qual se tem os valores de v e t/v, conforme observado na figura 4.

Figura 4 - Gráfico típico dos valores de (t/v) em função de v, para obtenção de b no cálculo de resistência específica.



Fonte: Adaptado de Almeida, Gonçalves e Guimarães (1991).

Em trabalho realizado por Zhao (2004a) foram determinados valores de resistência específica do lodo estudado, a tabela 7 apresenta os valores obtidos no estudo do referido autor, pode-se observar que o lodo bruto apresenta elevados valores de resistência à filtração, indicando a difícil remoção de água do mesmo.

Tabela 7 - Propriedades do lodo, com ênfase para a resistência a filtração.

Sólidos em suspensão (mg.L ⁻¹)	pH	Resistência específica à filtração (×10 ¹² m.kg ⁻¹)	Tempo de sucção (s)	Viscosidade do filtrado (mm ² .s ⁻¹)
4.400 – 4.600	6,6 – 6,9	58,6 – 82,7	57,3 – 68,9	1,0045 – 1,0122

Fonte: Adaptado de Zhao (2004a).

Pode-se observar que o lodo apresentado na tabela 7, tem elevada concentração de sólidos (4,4 – 4,6%) e elevada resistência a filtração, sendo que amostras com maior concentração de sólidos não estão diretamente relacionadas com a menor resistência a filtração, pois a menor ou maior facilidade em liberar água depende do arranjo das partículas. Em estudo realizado por De Souza e Scalize (2013) ficou evidenciado que não houve correlação entre a resistência específica e a concentração de SST nas amostras, pois a resistência se torna relativamente independente para altas concentrações de SST.

a) Características Quantitativas do lodo de ETA

O volume de água resultante nos processos de descarga dos decantadores e dos filtros é requisito fundamental para projetos de estações de tratamento de resíduos em ETAs. Segundo Richter (2001), o volume de lodo gerado em uma ETA encontra-se entre 0,2 a 5% do volume de água tratado pela estação de tratamento de água, contudo a casos excepcionais, onde a porcentagem pode atingir 30 a 40%. Ainda segundo o autor, são os decantadores convencionais que apresentam os valores mais baixos de geração de lodo, chegando a valores geralmente menores que 0,5%, contudo a concentração de sólidos é muito superior nos decantadores do que nos filtros.

De acordo com dados do IBGE (2010) o volume de água distribuída por dia em 2008 no Brasil foi de 61.063.492 m³/dia, deste total 39.282.607m³/dia eram tratados por ETAs de ciclo completo (convencionais). Considerando o valor médio descrito por Richter (2001) para a produção de lodo, de 2,5% do volume de água tratada, no ano de 2008 o valor médio no Brasil de produção de lodo foi de aproximadamente 98.2065 m³/dia.

A estimativa da produção da massa de lodo em sistemas de tratamento de água é outro parâmetro fundamental, ou seja, a determinação de sólidos produzidos. Esta quantificação do lodo é de extrema importância tanto para o dimensionamento como para a operação dos sistemas de tratamento, que envolvem o adensamento, a desidratação e as formas de uso e disposição.

A produção de resíduos das ETAs pode ser determinada por meio de três métodos: fórmulas empíricas; balanço de massa; e determinação direta a campo. A determinação direta a campo ocorre a partir da medição da camada de lodo nos decantadores, e determinação da concentração de sólidos do lodo. O balanço de massa corresponde na relação direta da produção de sólidos pela qualidade da água bruta e vazões da estação. E as equações empíricas, quantifica a produção de lodo considerando a concentração de sólidos na água

bruta e as relações dos coagulantes utilizados (sais de alumínio e/ou ferro). A escolha de um dos três métodos para a quantificação do lodo deve ser avaliada caso a caso, e preferencialmente, mais de um deve ser empregado, de modo a permitir verificações entre eles (CORNWELL, 2006).

Existem diversas equações empíricas para estimar a produção de lodo, fornecendo um valor aproximado da massa seca de resíduos produzidos em uma ETA. De acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) como os sólidos em suspensão presente na água bruta não são reativos sua concentração será a mesma do lodo gerado. Assumindo-se que outros produtos adicionados na água bruta (como polímeros e carvão ativado), produzam a mesma quantidade de SST no lodo e que quando a cal for usada como alcalinizante, a fração insolúvel seja de em média 10% da cal aplicada. Os autores sugerem que a quantidade total de sólidos em suspensão gerada, quando a coagulação é realizada pelo sulfato de alumínio (equação 3 ou equação 4) e pelo cloreto férrico (equação 5) é de respectivamente:

$$P_{ss} = Q(4,89D_{Al} + SST + D_p + D_{CAP} + 0,1D_{cal}) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$P_{ss} = Q(0,44D_{Sal} + SST + D_p + D_{CAP} + 0,1D_{cal}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$P_{ss} = Q(2,9D_{Fe} + SST + D_p + D_{CAP} + 0,1D_{cal}) \times 10^{-3} \quad (5)$$

Em que:

P_{ss} = produção de SST ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$);

Q = vazão de água bruta a ser tratada ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio ($\text{mg Al} \cdot \text{L}^{-1}$);

D_{Sal} = dosagem de sulfato de alumínio com 17,17% de Al_2O_3 ($\text{mg Sal} \cdot \text{L}^{-1}$);

D_{Fe} = dosagem de cloreto férrico anidro ($\text{mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$);

SST = concentração de sólidos em suspensão na água a ser tratada ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

D_p = dosagem de polímero seco ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

D_{CAP} = dosagem de carvão ativado pulverizado ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

D_{cal} = dosagem de cal hidratada ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

Ainda segundo os autores, devido as dificuldades de monitoramento da concentração de SST nas estações de tratamento de água, pode-se relacionar a turbidez com a concentração de SST, utilizando a equação 6.

$$SST = axTu \quad (6)$$

Em que:

SST = concentração de sólidos totais gerados na ETA (mg.L^{-1});

Tu = turbidez da água bruta (uT);

a = coeficiente a ser determinado experimentalmente (valor entre 0,7 e 2,2).

Contudo deve-se salientar que a estimativa da geração de SST pela turbidez deve ser utilizada com cuidado, uma vez que a água bruta com elevada cor aparente pode interferir nas leituras de turbidez. Diversas outras fórmulas empíricas são utilizadas para estimar a produção de sólidos nas estações de tratamento de água, as quais consideram a relação entre a turbidez a produção de sólidos. Destacando-se as descritas por:

American Water Work Association, AWWA (1987)

$$P = 3,5 \times 10^{-3} x Tu^{0,66} \quad (7)$$

$$P_s = 86400 x P x Q \quad (8)$$

Em que:

P = produção de sólidos (kg de matéria seca por m^3 de água tratada);

Tu = turbidez da água bruta (uT);

P_s = produção de sólidos seco (kg.d^{-1});

Q = vazão de água bruta a ser tratada ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

Association Francaise Pour L'etude Des Eaux, AFEE (1993)

$$P = (1,2 x Tu + 0,07 x C + 0,17 x D_{Al} + D_p) x 10^{-3} \quad (9)$$

$$P_s = 86400 x P x Q \quad (8)$$

Em que:

P = produção de sólidos (kg de matéria seca por m^3 de água tratada)

Tu = turbidez da água bruta (uT);

C = cor aparente da água bruta (uC);

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio (mg Al.L^{-1});

D_p = dosagem de polímero, ou outro aditivo (mg.L^{-1});

P_s = produção de sólidos seco (kg.d^{-1});

Q = vazão de água bruta a ser tratada ($\text{m}^3.\text{d}^{-1}$);

CETESB (*apud* SARON e LEITE, 2001)

$$P = (0,23xD_{Al} + 1,5xTu)x10^{-3} \quad (10)$$

$$P_s = 86400xPxQ \quad (8)$$

Em que:

P = produção de sólidos (kg de matéria seca por m³ de água tratada)

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio (mg Al.L⁻¹);

Tu = turbidez da água bruta (uT);

P_s = produção de sólidos seco (kg.d⁻¹);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³.d⁻¹);

Kawamura (2000)

$$P = (D_{Al} x F_1) + (Tu x F_2) \quad (11)$$

$$P_s = 86400xPxQ \quad (8)$$

Em que:

P = produção de sólidos (kg de matéria seca por m³ de água tratada)

D_{Al} = dosagem de sulfato de alumínio (mg Al.L⁻¹);

F₁ = fator que depende do número de molécula de água associadas a cada molécula de sulfato de alumínio (valor entre 0,23 a 0,26);

Tu = turbidez da água bruta (uT);

F₂ = razão entre a concentração de sólidos em suspensão presente na água bruta e a turbidez (valor entre 1,0 a 2,0).

P_s = produção de sólidos seco (kg.d⁻¹);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³.d⁻¹);

3.2.3 Impactos ambientais e toxicidade dos lodos de ETAs

Os RETAs comumente são lançados nos corpos hídricos de onde a água bruta foi processada, apesar das pressões governamentais e ambientais esta prática continua a ser realizada. Como já citado a NBR 10.004 de 2004 classifica os lodos gerados nas ETAs como resíduos sólidos, portanto sua disposição deve ser realizada sem ocasionar danos ao meio ambiente, sendo proibido seu lançamento *in natura* em recursos hídricos.

Segundo dados de Cordeiro (2001),o Brasil contava no ano de 2001 com aproximadamente 7.500 ETAs convencionais (de ciclo completo), gerando resíduos nos

processos de decantação e filtração, descartando-os na sua maioria diretamente nos corpos d'água deteriorando sua qualidade. As ETAs que dispõem seus resíduos em intervalos de tempo superior a 20 dias geram lodos com concentração de sólidos acima de 2,5%, agravando ainda mais o problema do lançamento de lodos em mananciais (CORDEIRO, 1999). Na figura 5 apresenta-se o impacto visual no corpo d'água após o lançamento de lodo de ETA.

Figura 5 - Córrego Carioca antes e após o lançamento de lodo de decantadores da ETA-Itabirito.



Fonte: Ribeiro (2007).

O descarte de lodo nos mananciais causa uma série de prejuízos aos corpos receptores, como assoreamento e deterioração da qualidade da água, além de possuírem características que os tornam potencialmente tóxicos, aos seres humanos, organismos aquáticos e plantas. Dentre os impactos diretos e indiretos ocasionados pelo lançamento de lodos em corpos hídricos, pode-se citar (ACHON, SOARES, MEGDA, 2005): Depleção na concentração de oxigênio dissolvido (OD); alteração da biota aquática; mortalidade da comunidade bentônica de invertebrados; mortalidade de peixes; redução do volume útil do rio.

Deve-se considerar ainda, que o lançamento de lodo nos corpos hídricos contribuindo para aumento da concentração de metais tóxicos nos bentos; diminuição significativa da luminosidade do meio, com redução da produção de fitoplânctons; toxicidade para organismos componentes da comunidade bentônica e planctônica relevantes na alimentação de peixes (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011). Deve-se considerar ainda que quando o coagulante presente na água é o sulfato de alumínio, o lodo gerado na ETA apresenta grande concentração deste metal, aumentando ainda mais seu potencial tóxico.

Evidencia-se que o lançamento de lodo provoca a deterioração da água nos mananciais a jusante, promovendo perda da qualidade da água bruta que porventura seja captada por outra estação de tratamento de água. Neste sentido faz-se necessário que as operadoras responsáveis pelas ETAs, acima de outros danos, sejam cientes que a postura negligente contra os resíduos compromete a qualidade da matéria-prima (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2013).

3.2.4 Tratamento de lodos de ETAs

A concepção do tratamento de lodos envolve a obtenção de parâmetros de funcionamento e diagnóstico da ETA (como tempo de funcionamento diário, vazões de água tratada, característica da água bruta, etc.), assim como obtenção de dados das unidades gerados de resíduos (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012). Deste modo, pode-se considerar o tratamento de resíduos de ETA é uma tarefa árdua, necessitando investimentos e pesquisas, sendo sua gestão considerado um os desafios da área do saneamento para o século XXI (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2013).

O tratamento dos resíduos gerados na ETAs objetiva a redução de volume para sua disposição de forma adequada, diminuir entre outros os riscos de poluição ambiental, custos de transporte e disposição final. O custo para o tratamento e disposição de lodo usualmente apresenta valores elevados (RICHTER, 2001), por isso muitas vezes o tratamento do lodo é negligenciado. Neste sentido, atualmente a forte enfoque para a diminuição dos resíduos gerados nas ETAs. Segundo as conclusões do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de ETA (2008), hoje há tendência internacional e de se reduzir a quantidade de lodo produzido nas ETAs, sendo que o restante deve ser reciclado ou reutilizado, e somente o que não puder ser aproveitado deve ser disposto. O que vai de encontro com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que prioriza na gestão dos resíduos a redução, o reuso e a reciclagem.

Há diferentes métodos utilizados para o tratamento dos RETAs, que comumente incluem a equalização, a regularização de vazão, o condicionamento, o adensamento, o desaguamento, e em alguns casos a secagem e incineração (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011). Todas as ETAs apresentam resíduos com características próprias, que não devem ser generalizadas. Por isso se faz necessário estudos e ensaios em laboratório antes de empregar qualquer tipo de produto ou método de tratamento, com a realização de ensaios de tratabilidade (FERREIRA FILHO, 1997; SABOGAL-PAZ e DI BERNARDO, 2005; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011; MATTOS e GIRARD, 2013).

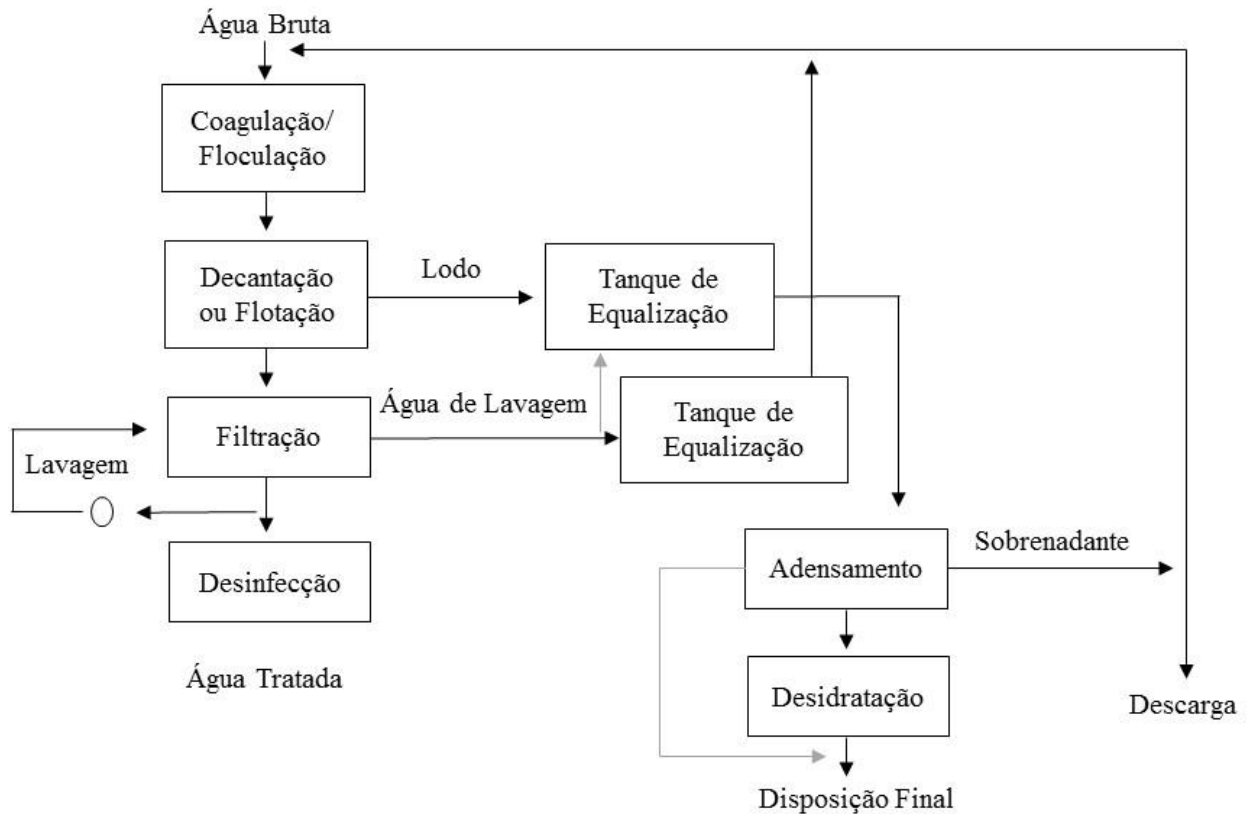
No tratamento dos RETAs um dos problemas mais sérios do lodo gerado é a redução de seu volume (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2008), sendo necessário a investigação de técnicas de tratamento adequadas para cada RETA. A remoção da maior parcela de água do lodo ocorre na etapa de adensamento, posteriormente a desidratação objetiva concentrar os sólidos do lodo e por fim, a destinação final propõe alternativas de disposição do lodo desidratado.

A utilização de flocculantes químicos como polímeros, melhora o desempenho do tratamento do lodo, proporcionando a estes atingir desempenho adequado nas operações. Diversos autores recomendam sua utilização para atingir resultados mais satisfatórios (CIZINSKÁ et al., 1992; REALI, 1999).

As tecnologias utilizadas em cada etapa do tratamento dos resíduos gerados nas ETAs dependem de uma série de fatores: características qualitativas da água bruta e do resíduo da ETA; as propriedades dos lodos; condições climáticas da região; a área necessária para implantação do tratamento; custo dos equipamentos, da operação e manutenção; custo da área; recursos humanos para operação e manutenção; necessidade de condicionamento; distância da ETA até o destino final; teor de água desejado após seu tratamento; e condições sociais, econômicas, culturais, legislativas e institucionais da região (CIZINSKÁ et al., 1992; SABOGAL-PAZ e DI BERNARDO, 2005; ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2008).

A concepção dos processos de tratamento de lodos também depende do tipo de sistema de tratamento da ETA. Na figura 6, apresenta-se um fluxograma geral que mostra a cadeia de processos de uma estação de tratamento convencional, com o tratamento de lodos correspondentes.

Figura 6 - Fluxograma de uma estação convencional (de ciclo completo) com tratamento de lodos.



Fonte: Richter (2001).

Por meio do fluxograma é evidenciada a possibilidade de recirculação da água de lavagem dos filtros e da água removida dos lodos, promovendo uma estação de tratamento sem perdas nos processos, com 100% de eficiência em termos de volume produzido. A alternativa de reaproveitamento da água de lavagem de filtros já é realidade em várias ETAs do Brasil. O reaproveitamento de 100% da água de lavagem já ocorre com sucesso em ETAs do Guaraú e Alto da Boa Vista, ambas responsáveis pelo abastecimento de água de parte da Região Metropolitana São Paulo (FERREIRA FILHO, 1997). No trabalho realizado por Oliveira e Barcelo (2012) na ETA de Anápolis/GO, também observa-se que o retorno da água de lavagem de filtro da ETA é viável.

Por meio do fluxograma também pode-se observar que o lodo adensado pode ser encaminhado tanto para a etapa de desidratação, como para a disposição final, dependendo do teor de umidade resultantes do adensamento e o exigido na disposição que terá o lodo. Para exemplificar, um lodo que terá como destino a utilização em áreas agrícolas, pode ser

encaminhado diretamente do adensamento para a aplicação no solo, pois o lodo pode ser aplicado no solo na forma líquida, semi-sólida ou sólida, dependendo do meio de transporte. Porém lodo que terá como destino aterro deve ter uma alta concentração de sólidos (com redução de seu volume), sendo necessário a desidratação prévia antes da disposição em centrais de aterro.

Contudo é fundamental salientar que para o descarte destes resíduos quanto maior for sua secagem e menor o seu teor de umidade, melhor será seu processamento e manejo, pois a alto teor de umidade aumenta o risco de impacto ambiental (PAIVA e PARREIRA, 2012).

3.2.4.1 Adensamento

O adensamento ou espessamento é a primeira etapa do tratamento do lodo, sendo uma das operações unitárias mais importantes do tratamento da fase sólida, devido ao aumento da concentração de sólidos e diminuição do volume de lodo para posteriores desidratação e disposição final. Deste modo influenciando o desempenho de todo o tratamento dos lodos (WATANABE e TANAKA, 1999). O processo de remoção da água dos resíduos auxilia na diminuição de custos de funcionamento das operações de desidratação e eliminação dos resíduos (AYOL, DENTEL e FILIBELI, 2005).

A redução do volume realizado no adensamento do lodo propicia resultados mais satisfatórios para as unidades de desidratação, já que alguns equipamentos, como centrífugas, operam mais eficientemente quando alimentados com lodo mais concentrado, ou seja, com maior concentração de sólidos (RIJK, GRAAF e BLANKEN, 1994; REALI, 1999). O adensamento deve resultar em uma concentração de sólidos totais (ST) no lodo na ordem de 2% para que possa ser submetido a etapas posteriores de tratamento (MATTOS e GIRARD, 2013).

O adensamento de lodos das ETAs pode ser efetuado por meio de sedimentação (gravidade) ou por flotação a ar dissolvido (principais métodos), ou ainda por adensadores mecânicos (FERREIRA FILHO, 1997; RICHTER, 2001; METCALF e EDDY, 2003; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN 2011). Deve-se ressaltar que cada técnica de adensamento apresenta vantagens e desvantagens e seus estudos envolvem não apenas aspectos econômicos, mas aspectos técnicos relacionados com a determinação de parâmetros de projeto (FERREIRA FILHO, 1997). Um panorama apresentado por Sabogal Paz (2007), no quadro 1, relata as principais vantagens e desvantagens do adensamento realizado por flotação, sedimentação e por métodos mecânicos.

Quadro 1 – Panorama das vantagens e desvantagens dos métodos de adensamento.

Vantagens	Desvantagens
Sedimentação por batelada	
Não requer pessoal qualificado, comparada aos outros métodos de adensamento; Recomendada para lodos de abrandamento de água, os quais sedimentam com facilidade.	Necessita de maiores áreas de implementação, comparada com outras técnicas de adensamento.
Adensamento por Flotação	
Eficiente na remoção de <i>Cryptosporidium</i> e <i>Giardia</i> ; Pode operar com maiores taxas de aplicação de sólidos, permitindo unidades mais compactas.	O sistema apresenta altas taxas de recirculação; Altos custos de implementação, operação e manutenção.
Adensamento Mecânico	
Necessita menores áreas de implementação, comparada com outras técnicas de adensamento; Apresenta baixo custo de operação e adensa rapidamente os resíduos.	A unidade necessita de energia e de manutenção especializada; Custos de implementação podem ser altos, comparada aos outros métodos de adensamento; Limpeza do meio filtrante pode ser complicada; O controle da dosagem de polímeros pode ser complicada.

Fonte: Adaptado de Sabogal Paz (2007).

Diversos fatores podem interferir no processo de adensamento do lodo, entre os quais destaca-se: tamanho e forma de partícula; porcentagem de sólido do lodo; característica da superfície; e viscosidade do líquido. Fatores os quais podem estar relacionados com a utilização de polímeros.

Os polímeros são utilizados no adensamento de lodos, contribuindo significativamente no desempenho deste processo de tratamento. Os polímeros empregados podem ser classificados como naturais ou sintéticos, e dependendo da carga que possuem em solução aquosa, são classificados como catiônico, aniônico ou não-iônico (DI BERNARDO, DI BERNARDO e CENTRURIONE FILHO, 2002). Para o adensamento por sedimentação e por flotação a indicação da dosagem de polímero varia consideravelmente, estes valores podem ir

de 0 até 10 mg pol/g de SST. Para o adensamento por meios mecânicos a dosagem de polímero depende de cada equipamento, atendendo as especificações do fabricante.

A seguir estão descritas as técnicas de adensamento utilizadas no tratamento de lodos de estações de tratamento de água, apresentado as principais características de cada método, exibindo um panorama das alternativas de tratamento de lodos de estações de tratamento de água, por adensamento.

a) Adensamento por Sedimentação ou Gravidade

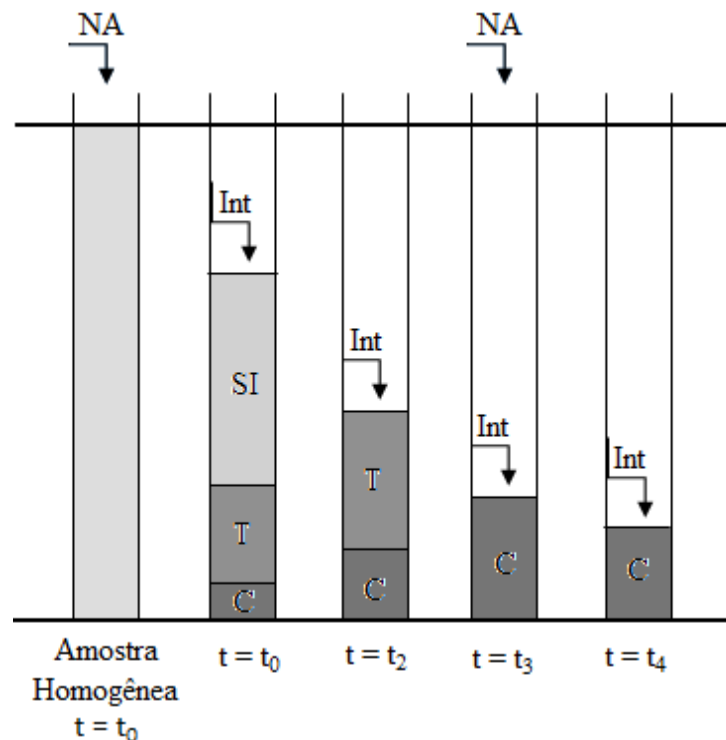
O adensamento por sedimentação é o mais antigo e empregado, podendo operar em fluxo contínuo ou por batelada, o que depende particularmente da operação dos decantadores, como por exemplo, se estes operam por limpeza manual ou mecanizada. Na sedimentação por batelada após o adensamento de algumas horas o sobrenadante clarificado e o lodo depositado no fundo são removidos, já na sedimentação por fluxo contínuo a operação é semelhante à de decantadores de manto de lodo, sendo normalmente a mais utilizada. Contudo, em instalações de pequeno porte o adensamento por batelada apresentar-se mais vantajoso economicamente (RICHTER, 2001).

Diferente do que ocorre nas unidades de decantação, com sedimentação livre e floclulenta (tipo I e II), a sedimentação no adensamento por gravidade é por zona (sedimentação impedida) e por compactação (compressão) (tipo III e IV) (NUNES e SOBRINHO, 2002). Esses fenômenos ocorrem quando a concentração de sólidos é mais elevada.

A sedimentação impedida é caracterizada por uma interface ou frente de clarificação que se desloca para baixo com velocidade constante, após a interface de clarificação a concentração de sólidos aumenta, onde ocorre a interface entre as partículas durante a sedimentação, formando a região de transição e, a partir do fundo vai se formando a zona de compressão, onde ocorre a compactação (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

Em um ensaio de adensamento por sedimentação pode-se perceber que com o passar do tempo a zona de transição desaparece dando lugar apenas a zona de compressão, onde a concentração de sólidos permanece aproximadamente constante durante o tempo, como pode-se perceber na figura 7, que ilustra o esquema de clarificação e adensamento.

Figura 7 - Esquema ilustrativo da clarificação e adensamento.



Fonte: Adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011).

Int.: Interface. SI: Sedimentação impedida. T: Região de transição. C: Zona de compressão.

O adensamento por gravidade é a alternativa mais utilizada para o adensamento de lodos no Brasil, podendo ser utilizada com eficácia no tratamento de resíduos de estações de tratamento de água (RETAs). Contudo o adensamento por gravidade nem sempre resulta em concentrações apropriadas de sólidos em suspensão, podendo utilizar como alternativa unidades de flotação a ar dissolvido (RIJK, GRAAF e BLANKEN, 1994)

Deste modo salienta-se a realização de ensaios em colunas de sedimentação para se obter valores apropriados de ST, visando o tratamento posterior de acordo com as características da ETA. Com os resultados dos ensaios de sedimentação são obtidos valores utilizados no dimensionar das unidades de adensamento. Existem diferentes dimensões para os adensadores circulares por sedimentação, com dimensões padrões que podem variar de 4 a 20 metros de diâmetro do tanque, e de 3,5 a 4,5 metros de altura cilíndrica (ECOSAN, 2015).

Um adensador por sedimentação é composto por sistema raspador de fundo, viga metálica para suporte do equipamento, acionamento central, e vertedores periféricos. O lodo adensado é recolhido por calha e encaminhado por tubulação de drenagem para posterior unidade de tratamento, a água clarificada é recolhida por calhas instaladas na parte superior

do adensador. Vários fatores podem influenciar no comportamento da sedimentação, como o tamanho do floco, densidade, velocidade, viscosidade, floculação, efeito parede durante a decantação, assim como a formação de agregados, que podem diminuir o efeito de compressão dos sólidos (ZHAO, 2004b).

b) Adensamento por Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

No sistema de flotação a ar dissolvido (FAD), microbolhas são introduzidas na massa líquida, propiciando à retirada de flocos, devido à redução de sua densidade (RICHTER, 2009; MORUZZI e REALI, 2007). Os flocos acumulam-se na superfície do tanque, formando uma camada de lodo, a qual é removida periodicamente por raspadores. A eficiência e o comportamento do processo de flotação, é influenciada consideravelmente por parâmetros físicos, como tempo de mistura (rápida e lenta) e gradiente de velocidade, mecanismos de coagulação e floculação (CENTURIONE FILHO e DI BERNARDO, 2000).

O adensamento de lodo por flotação mostra-se eficaz para o aumento da concentração de sólidos (CIZINSKÁ et al., 1992). Em estudos realizados por Patrizzi, Reali e Cordeiro (1999) foi comparado os processos de adensamento por sedimentação e por flotação para o tratamento do lodo proveniente de decantares, os resultados indicam maior eficiência para FAD em termos qualitativos, com uma concentração de sólidos de 36% superior. Porém na FAD foram utilizadas altas taxas de reciclo.

Foram identificados alguns parâmetros que afetam o adensamento de lodo por flotação a ar dissolvido, entre eles: a taxa de arraste de sólidos; razão ar/sólido; profundidade de flotação acima do nível da água; índice do volume de lodo; uso de produtos químicos; e tamanho das bolhas (RIJK, GRAAF e BLANKEN, 1994).

As unidades de adensamento por flotação são projetadas do mesmo modo que as de sedimentação, com a realização de ensaios laboratoriais a partir de lodo proveniente de unidades já existentes. Deste modo, para o dimensionamento de adensadores de estações de tratamento de lodo por FAD são realizados ensaios em coluna de flotação com alimentação em batelada, visando a obtenção de curvas de adensamento, ou seja, curvas de variação da interface lodo/água clarificada (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

c) Adensadores mecânicos

Existem diversos fabricantes e empresas que disponibilizam equipamentos mecânicos para realizar o adensamento de lodos de estações de tratamento de água. Os principais tipos de adensadores mecânicos são: adensador mecânico de esteira ou mesa gravimétrica;

adensador dinâmico helicoidal e tambor rotativo; densificador de disco ou circular; e densificador parafuso.

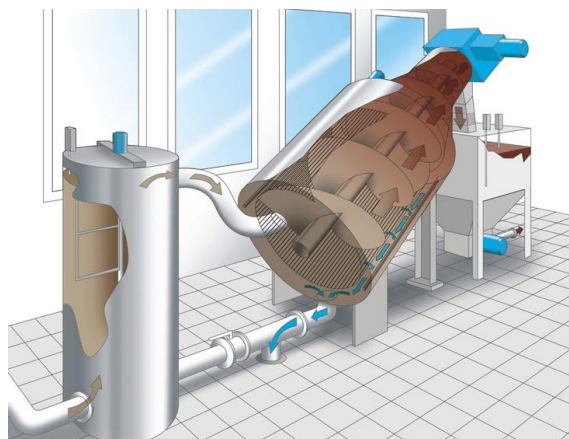
Os densificadores de esteira também são conhecidos como mesa gravimétrica, o equipamento é constituído por uma esteira com diversos raspadores, neste percurso a água intersticial é retirada parcialmente. O densamento por meio deste equipamento resulta em um consumo de polímero na ordem de 1,0 a 3,5 g pol/Kg de SST, no lodo o teor resultante de SST é entre 2,0 a 4,5% (massa/massa) (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

O densificador dinâmico helicoidal e tambor rotativo são compostos basicamente por um tambor perfurado que gira lentamente, a água livre passa através da tela do filtro, sendo eliminada devido as rotações do tambor. Os sólidos são retidos na superfície do tambor e conduzidos para a extremidade de descarga, devido rotação contínua. De acordo com informações do fabricante esse densificador tem capacidade de operação de 6 até 130 m³.h⁻¹, para sua operação o lodo deve ter teor de sólidos entre 0,3 a 4%, obtendo lodo densificado com concentração de sólidos de 6 a 8% (ASHBROOK, 2015).

Densificadores mecânicos de disco ou circular constituem em uma combinação de sistema mecânico e estático para o densamento (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012). O lodo destinado para o densamento, posterior adição de polímero, é encaminhado para um tanque de reação, e em seguida deposita-se na superfície do disco de filtração.

Os equipamentos densificadores de lodos tipo parafuso (figura 8) são constituídos de reator de floculação, por uma cesta, responsável pela captura dos sólidos, e por parafuso que gira lentamente conduzindo o lodo para a parte superior, e coletado por calha.

Figura 8 - Densificador tipo parafuso.



Para o funcionamento do adensador tipo parafuso o teor inicial de sólidos de sólidos deve ser de 0,6 a 0,9% e a dosagem de polímero entre 2 a 4 g pol./kg SST (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

3.2.4.2 Desidratação/Desaguamento

No desaguamento procura-se aumentar a concentração de sólidos modo reduzindo o percentual de água no lodo e diminuindo o volume a ser disposto ou reutilizado. Em qualquer técnica de desaguamento é desejável obter torta de lodo com concentração de SST superior a 200 g.L⁻¹, ou teor de SST superior a 20% em massa/massa (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

O desaguamento pode ser realizado naturalmente ou por equipamentos mecânicos, cada técnica possui suas vantagens e desvantagens. Por isto se faz necessário a realização de ensaios para a determinação da técnica que se enquadra com as propriedades do lodo e a realidade da ETA, analisando o custo e área necessária para sua implementação.

a) Desaguamento/Desidratação Mecânico

Os equipamentos utilizados para o desaguamento mecânico incluem: prensa desaguadora (“Belt Filter”); Centrífuga; Filtro prensa de esteira; Filtro prensa de placas; Filtro rotativo a vácuo; Prensa desaguadora tipo parafuso (RICTHER, 2001; DI BERNARDO, DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

Antecedente a desidratação mecânica do lodo, é usual o adensamento e a utilização de polímero para propiciara uma mais fácil retirada da água presente no lodo (DI BERNARDO, DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002). Na tabela 6 é apresentado as características dos principais processos de desaguamento de lodos, segundo Richter (2001).

Quadro 2 - Características das principais tecnologias de desaguamento.

Tecnologia	Aplicações	Limitações	Custo relativo
Prensa desaguadora	Capaz de obter um lodo relativamente seco, com 40- a 5% de sólidos secos. Lodo de sulfato 15 a 20%.	Sua eficiência é muito sensível às características da suspensão. As correias podem se deteriorar rapidamente na presença de material abrasivo.	Baixo
Centrífuga	Capaz de obter um lodo desidratado com 15 a 35% de sólidos. Lodos de sulfato 16 a 18%. Lodos de cal desidratam mais facilmente. Taxa de captura de sólidos entre 90 a 98%. Adequada para áreas com limitação de espaço.	Não tão efetiva na desidratação como a filtração. O tambor está sujeito à abrasão.	Médio
Filtro prensa	Usado para desidratar sedimentos finos. Capaz de obter torta com 40 a 50% de sólidos em lodos de cal, com uma taxa de captura de até 98%.	Necessita a aplicação de cinza e cal. Elevação do pH a 11,5. Troca do meio filtrante demorada. Elevado custo operacional e energia.	Alto
Filtro rotativo a vácuo	Mais indicado para desidratar sedimentos finos granulares, podendo obter torta de até 35 a 40% de sólidos e uma taxa de captura entre 88 a 95%.	É o método menos eficaz de filtração e eleva do consumo de energia.	Muito alto

Fonte: Adaptado de Richter (2001).

b) Desaguamento/Desidratação Natural

No processo de desaguamento natural ocorre a diminuição da umidade do lodo apenas por gravidade e evaporação natural. O desaguamento natural pode ser realizado por meio de leitos de secagem, lagoas de lodo e filtração por geotêxtil (DI BERBARDO, DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002; RICHTER, 2001; DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

Nos leitos de secagem o desaguamento ocorre incluindo a evaporação e a drenagem em meio poroso. Nas lagoas a remoção da água do lodo pode ocorrer por três fases: retirada da água sobrenadante; evaporação; e transpiração. Quando há disponibilidade de área as

Lagoas são ótimas alternativas, principalmente por apresentarem baixo custo (ACHON, BARROSO e CORDEIRO, 2008). O desaguamento por geotêxtil parte do princípio de drenagem do excesso de água do lodo, a água passa pelos microporos de geotêxtil, aumentando a concentração de sólidos e conseqüentemente diminuição do material retido. De acordo com Ferreira e Vianna (2013) a técnica de desaguamento de lodo por meio da utilização de geotêxtil recentemente foi introduzida no Brasil.

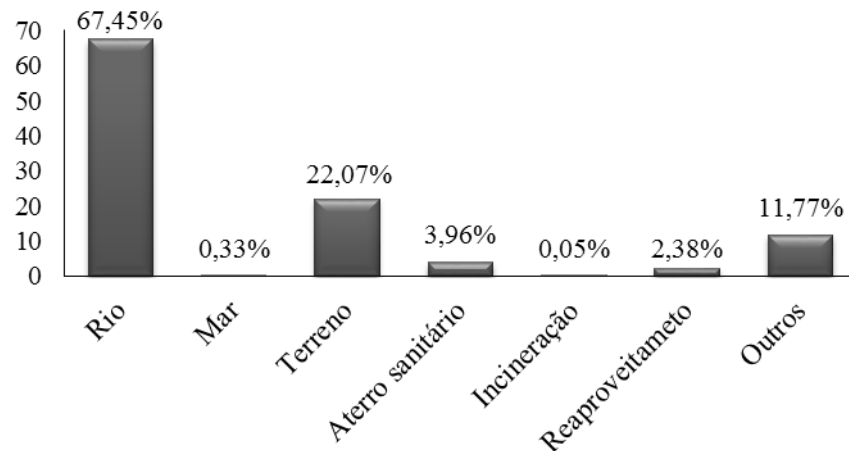
As técnicas de desaguamento natural são menos complexas, fáceis de operar e requerem menos energia operacional, contudo apresentam como desvantagem requererem maior área, dependerem das condições climáticas e de intensivo trabalho para a remoção do lodo (DI BERNARDO, DI BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2002).

3.2.4.3 Disposição final e alternativas de formas de tratamento do lodo de ETAs

Diversas alternativas estão sendo buscadas para se dispor e/ou utilizar o lodo de ETAs da melhor forma possível, porém devido às distintas características do lodo gerado, ainda existem lacunas de como dispor este resíduo causando menor impacto ambiental possível (ANDRADE et al., 2014). Contudo salienta-se que o tratamento dos RETAs é primordial antes do lançamento no ambiente para minimizar a problemática do seu descarte (MATTOS e GIRARD, 2013).

No ano de 2008 o Brasil possuía 5.564 municípios (IBGE, 2010), destes 2.098 municípios apresentavam geração de lodo no processo de potabilização da água, com diferentes destinos para o lodo produzido. Pode-se observar por meio da figura 9 que 67,44% dos municípios destinavam o lodo gerado para rios, e apenas 2,38% dos municípios reaproveitava o lodo. A maior parte do lodo gerado é destinado indevidamente aos mananciais superficiais ocasionando impactos adversos para os corpos receptores. Vale-se salientar que um mesmo município pode dar mais de um destino ao lodo gerado no processo de tratamento da água.

Figura 9 - Destinação do lodo dos Municípios Brasileiros em porcentagem.



Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

Ainda em relação a problemática do descarte indevido de lodo, de acordo com estudos realizados no Estado de São Paulo, em um levantamento na Bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí, indicam que em termos populacionais 56% das ETAs lançam o lodo em mananciais hídricos, 21% em aterros, 15% não disponibilizam dados, 6% em ETEs e 1% em outros locais (PCJ, 2011).

Nos países desenvolvidos o descarte de lodo apresenta outra configuração, onde a maior parte dos resíduos são dispostos em aterros, porém na maioria dos países em desenvolvimento o lodo geralmente é descartado a jusante do manancial de captação (BABATUNDE e ZHAO, 2007), evidenciando-se a necessidade de uma postura adequada dos gestores de ETAs quanto ao tratamento e disposição de seus resíduos.

Para avaliar as alternativas mais adequadas de disposição final do lodo deve-se levar em consideração o tipo e qualidade do lodo, os custos envolvidos, o modo de encaminhamento e a sustentabilidade do processo. As alternativas de disposição final e/ou de aproveitamento devem ser compatíveis com a realidade local, fator indispensável para bom gerenciamento destes resíduos (MATTOS e GIRARD, 2013).

Os estímulos para o adequado gerenciamento e disposição final desses resíduos está ganhando força pelas empresas de saneamento devido a regulamentação sobre a preservação e qualidade ambiental, consolidando a co-responsabilidade e o comprometimento dos recursos naturais (TARTARI et al., 2011).

As principais alternativas de disposição final de lodos de ETAs, incluem: aplicação em solos agrícolas; uso de lodo na fabricação de material cerâmico e construção civil;

recuperação do coagulante; disposição em estação de tratamento de esgoto (ETE); disposição em aterro sanitário; e incineração.

a) Aplicação em solos agrícolas

A aplicação em solos agrícolas consiste em aplicar o lodo no solo, podendo ser aplicada de forma líquida, semi-sólida ou sólida, dependendo do meio de transporte. Richter (2001) afirma que o volume aplicado no solo corresponde em aproximadamente 2 a 4 cm/ano, porém a taxa de aplicação deve ser determinada por estudos prévios.

Assim, antes de utilizar qualquer lodo de ETA em solos cultiváveis deve-se fazer um estudo detalhado dos constituintes do resíduo. Lodo com altas concentrações de alumínio tendem a fixar fósforo no solo prejudicando o crescimento das plantas, além disso, constituintes presentes nos coagulantes como metais pesados podem acarretar degradação e contaminação do solo (SALES e SOUZA, 2009). Por isto, apesar de conter teor de matéria orgânica, os lodos de ETAs não são muito atrativos para o uso na agricultura.

b) Uso de lodo na fabricação de material cerâmico e construção civil

O solo utilizado na fabricação de matérias cerâmicos e da construção civil devem obedecer alguns requisitos, os quais também devem estar presentes nos lodos utilizados para tal finalidade. A utilização de lodos de ETAs na fabricação de material cerâmico e construção civil, apresenta-se como uma alternativa mais adequada para a disposição ambientalmente adequada. Principalmente referente ao conceito de reciclagem, e mais rápida considerando o tempo necessário para a implantação e operação exclusiva para a disposição destes resíduos (JANUÁRIO e FERREIRA FILHO, 2007).

c) Recuperação do coagulante

As ETAs que utilizam sais de alumínio no processo de coagulação geram lodos com altas concentrações destes metais. O hidróxido de alumínio insolúvel presente no lodo de ETA pode ser utilizado como coagulante no tratamento primário de efluentes, auxiliando na remoção dos poluentes, uma vez que os coagulantes recuperados não podem ser utilizados no tratamento de águas (SALES e SOUZA, 2009). Mas também deve-se considerar o reciclo do coagulante tratamento de RETAs. Os processos consistem basicamente em solubilizar os hidróxidos contidos no lodo, por meio de ataque ácido.

d) Disposição em estação de tratamento de esgoto (ETE)

A disposição do lodo de ETAs em sistema de coleta de esgoto é uma solução viável, tendo em vista que o tratamento será concentrado, eliminando a implementação de sistemas de tratamento de resíduos nas próprias ETAs, gerando economia no sistema operacional da unidade de tratamento. O tratamento dos RETAs deve ser realizado simultaneamente nas ETEs. Porém deve-se salientar que esta prática pode acarretar algumas interferências nas ETEs, devendo ser analisado criteriosamente.

e) Disposição em aterro sanitário

A disposição de lodo em aterros sanitários é uma alternativa consolidada, sendo a prática mais simples de disposição de lodos, podendo ser realizado em aterros municipais ou particulares. Nos EUA 20% das cidades com uma população de até 100 mil habitantes realizam disposição em aterros (AWWA, 1987).

Contudo com a legislação restritiva e os altos custos de transporte e disposição, relacionado com a escassez de áreas adequadas, principalmente em regiões urbanizadas, está se buscando técnicas e soluções mais eficientes e econômica (JANUÁRIO e FERREIRA FILHO, 2007). Ainda segundo os autores, quando corretamente projetado e operado, a disposição do lodo em aterros sanitário é um método seguro para a saúde pública e ambiental.

f) Incineração

A incineração diminui consideravelmente o volume final do lodo, contudo devido a geração das cinzas, a incineração não elimina a fase de desidratação dos lodos e também não dispensa demais alternativas para a disposição dos resíduos gerados, desta forma não resolvendo totalmente o problema. Outros empecilhos da incineração são o alto custo, a necessidade de secagem prévia do lodo e a formação de incrustações ocasionadas por resíduos aluminosos.

A incineração é usada para destruir a matéria orgânica presente no lodo seco gerado na ETAs (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012). Geralmente este processo ocorre via oxidação térmica a temperatura elevada (superiores a 1000 °C), os métodos desenvolvidos para incineração dos resíduos incluem a injeção líquida, fornos rotativos, câmara fixa e leito fluidificado.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Município de São Gabriel está localizado na região oeste do estado do Rio Grande do Sul, sua área total é de 5.023,821 km², e conta com uma população de 60.425 habitantes (IBGE, 2010). Dentro do contexto hidrológico o território municipal está localizado nas Bacias Hidrográficas Vacacaí-Vacacaí Mirim e Santa Maria (região Hidrográfica do Guaíba e do Uruguai).

O abastecimento de água da cidade de São Gabriel é operado pela empresa São Gabriel Saneamento, decorrente do contrato de concessão desde 2012, atendendo em torno de 54.000 habitantes, representando aproximadamente 97% da população urbana da cidade.

O sistema de abastecimento de água de São Gabriel é composto por uma única estação de tratamento de água. A localização da área da ETA de São Gabriel pode ser visualizada na figura 10. A captação superficial ocorre no Rio Vacacaí, com barragem de captação distante aproximadamente de 20 km da ETA. A partir da chegada da água bruta na ETA, esta é tratada e distribuída para a população e encaminhada para os reservatórios.

Figura 10 - Localização da área da Estação de Tratamento de Água de São Gabriel.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2015.

O sistema de captação das águas superficiais ocorre por meio de adutora, com captação em remanso à margem do Rio Vacacaí, ou seja, ao lado da barragem no leito do rio. A captação é feita por meio de elevatória com dois conjuntos moto-bombas com capacidades nominais de 130 L.s^{-1} , que operam individualmente ou em conjunto.

A estação de tratamento de água de São Gabriel (Figura 11) opera por meio de estação convencional (ciclo completo), composta pelos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. A capacidade de operação nominal é de 135 L.s^{-1} , com vazão média de operação de 137 L.s^{-1} , podendo chegar a trabalhar com vazão de 220 L.s^{-1} .

Figura 11 - Estação de Tratamento de Água de São Gabriel.



Fonte: São Gabriel Saneamento.

A água bruta que é captada da barragem chega a ETA por meio de adutora, na entrada da estação a água passa por uma calha Parshall para a medição de vazão, sendo que por meio do centro de controle operacional (CCO) ocorre a dosagem de produtos químicos, de forma automatizada. Primeiramente realiza-se a pré-cloração, dependendo da qualidade da água bruta, em seguida, na saída da calha Parshall é adicionado o coagulante (Cloreto de Polialumínio –PAC). Quando se faz necessário também ocorre a dosagem de carvão ativado,

mas esta é restrita a períodos de proliferação de algas no leito do rio, o que ocorre de forma esporádica e não sendo tão comum.

A estação de tratamento de água de São Gabriel é composta por seis floculadores mecânicos com $14,52 \text{ m}^2$ de área por unidade e volume de $36,3 \text{ m}^3$, totalizando um volume de $217,7 \text{ m}^3$. A distribuição da água floculada é realizada nas entradas dos decantadores através de cortinas distribuição. A ETA conta com dois decantadores do tipo convencional de fluxo horizontal, com área superficial total de 700 m^2 e volume total de $1.855,00 \text{ m}^3$. A água decantada é filtrada em seis filtros de fluxo descendente, com leito simples de areia, cada sistema de filtração possui área de $16,65 \text{ m}^2$, com área superficial total de filtração de 100 m^2 . A figura 12 apresenta uma vista geral da ETA, com ênfase para os decantadores de fluxo horizontal e para os filtros da estação.

Figura 12– Vista geral de ETA de São Gabriel no com ênfase para os decantadores de fluxo horizontal e para os filtros.



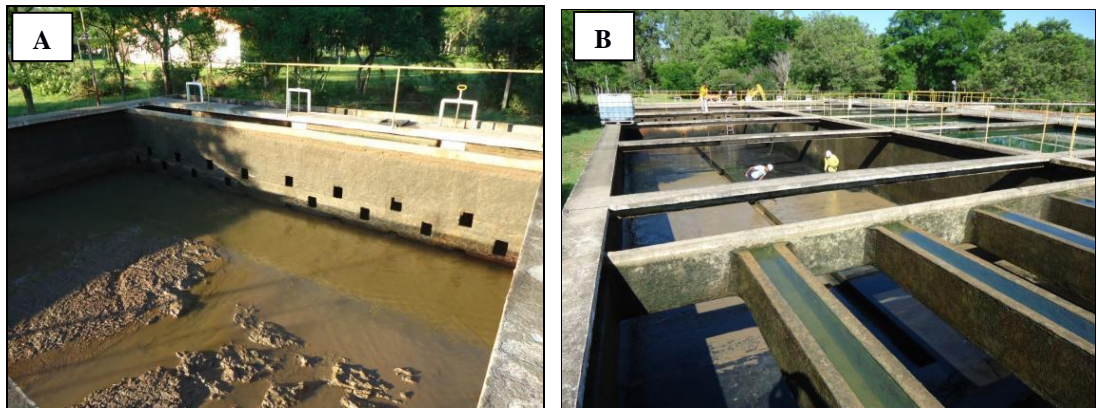
Fonte: São Gabriel Saneamento.

Deste modo, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar o desempenho do adensamento de lodos da Estação de Tratamento de Água de São Gabriel – RS, estudando comparativamente os processos de sedimentação e flotação a ar dissolvido (FAD). Visando a realização experimental o lodo utilizado foi coletado juntamente aos decantadores da ETA de São Gabriel – RS, sendo realizadas duas campanhas de amostragem. A primeira coleta de lodo ocorreu no dia 06 de agosto de 2015, sendo este após caracterizado utilizado nos ensaios em teste de jarros, para avaliação dos polímeros, e nos ensaios preliminares de adensamento.

A primeira coleta remeteu a amostragem simples, de forma pontual, coletando-se aproximadamente 200 litros de lodo acumulado no fundo dos decantadores, na região após a cortina de distribuição.

A segunda coleta de lodo foi realizada em 18 de novembro de 2015, a fim de se obter uma amostra mais representativa da realidade do lodo gerado na ETA de São Gabriel, esta ocorreu durante a higienização dos decantadores, com lodo acumulado durante o período de 65 dias. Um processo de higienização dos decantadores pode ser observado na figura 13 A e B.

Figura 13 - Processo de higienização dos decantadores da ETA de São Gabriel. A - Lodo acumulado em um decantador da ETA. B - Processo de higienização de um dos decantadores da ETA de São Gabriel.



Fonte: São Gabriel Saneamento.

A ETA de São Gabriel não disponibiliza de reservatório (tanque de recepção), para o armazenamento do lodo acumulado nos decantadores e para a água utilizada no processo de limpeza dos mesmos, sendo estes resíduos descartados a jusante do manancial de captação no decorrer do processo de higienização. Com o intuito de se obter dados efetivos da real concentração de sólidos no lodo, posterior a limpeza dos decantadores, após o esvaziamento dos mesmos, foram coletadas amostras da torta de lodo concentrada no fundo do decantador e adicionado um volume de água correspondente ao da sua limpeza, sendo este proporcional ao volume de lodo acumulado no decantador.

Os dados estimados do volume de lodo e água utilizada durante a limpeza dos decantadores foram fornecidos pelo químico responsável pela operação da ETA, a partir destes valores pode-se estimar a quantidade de água empregada na diluição do lodo, e

consequentemente a concentração de sólidos no resíduo, se estes fossem encaminhados para um possível tanque de recepção na ETA. Ao fim do período de coleta e limpeza do decantador, as amostras foram encaminhadas para o laboratório, sendo homogeneizadas com o volume correspondente de água e em seguida caracterizadas, para serem utilizadas em posteriores ensaios em teste de jarros e ensaios experimentais de adensamento. Ressalta-se que a concentração de sólidos do lodo foi determinada antes e após a adição de água de diluição. Todo o procedimento de coleta seguiu o estabelecido pela NBR 10.007 (ABNT, 2004d).

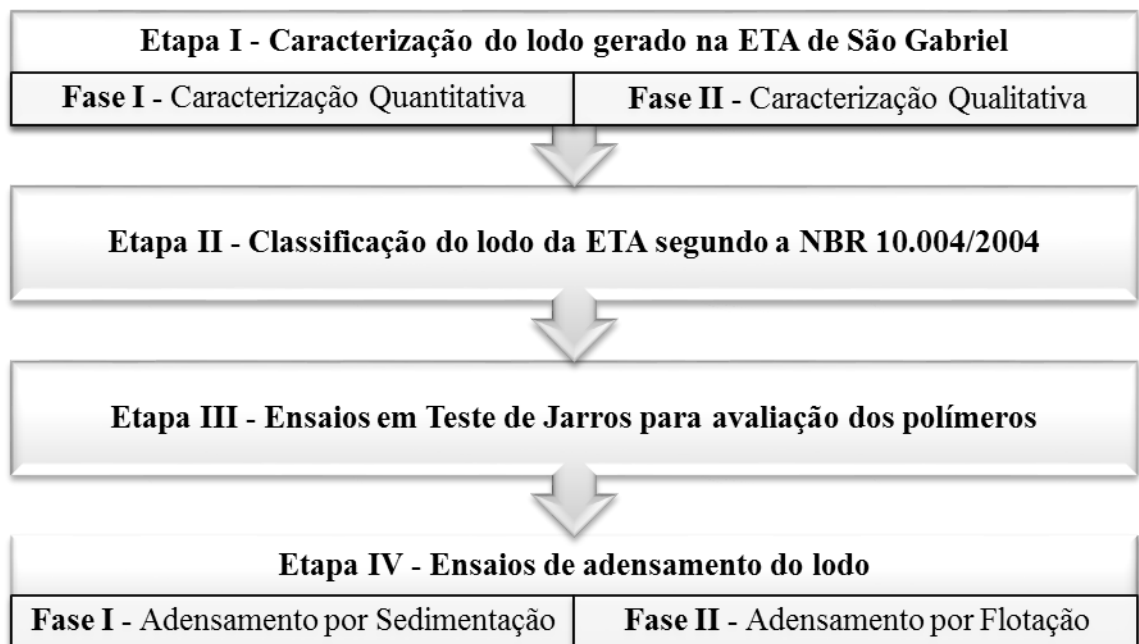
Para a realização dos ensaios de adensamento, o lodo coletado em ambas as fases do experimento, foi armazenado em galão de 200 litros à temperatura ambiente. Antes da realização de cada ensaio o lodo era homogeneizado, agitando-o suscetivelmente com o auxílio de haste por meio de agitação manual.

5 MATERIAL E MÉTODOS

No presente capítulo estão contidas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento experimental referente ao adensamento do lodo dos decantadores da ETA de São Gabriel – RS, por sedimentação (gravidade) e flotação por ar dissolvido. Todos os ensaios experimentais foram realizados na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), nas dependências físicas do Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA).

A investigação experimental foi dividida em etapas, para melhor descrever os materiais e métodos utilizados para a obtenção dos resultados, assim a figura 14 apresenta organograma que descreve a realização das principais etapas da pesquisa.

Figura 14 - Organograma que descreve a realização das principais etapas da pesquisa. Etapa I - Caracterização quantitativa e qualitativa do lodo da ETA; Etapa II – Classificação do lodo da ETA segundo a NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a); Etapa III – Avaliação das diferentes dosagens e tipos de polímeros em Teste de Jarros; Etapa IV – Ensaio de adensamento do lodo da ETA por sedimentação e flotação a ar dissolvido.



5.1 ETAPA I - CARACTERIZAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA DE SÃO GABRIEL

Esta etapa teve por finalidade caracterizar o lodo da ETA de São Gabriel quantitativamente e qualitativamente. A caracterização quantitativa refere-se à geração total de sólidos (resíduo) produzido na ETA de São Gabriel, o qual foi determinado por equação

empírica e medição *in loco*. A fim de investigar as características qualitativas do lodo coletado, foram analisados parâmetros físico-químicos e microbiológicos, que podem ser utilizados para avaliar o impacto resultante do lançamento dos lodos em corpos receptores.

5.1.1 Fase I - Caracterização Quantitativa

A quantificação da massa de lodo gerado nos decantadores da ETA de São Gabriel foi realizada mediante a utilização de equação empírica e medição *in loco*. Na quantificação empírica, para a base de cálculos foi estimada a concentração de sólidos em suspensão pelo valor da turbidez da água bruta e posteriormente verificado a geração total de sólidos produzido na ETA. Os dados utilizados na base dos cálculos da massa de lodo dos decantadores foram coletados na ETA de São Gabriel, compreendendo o período de Julho de 2014 a Junho de 2015.

A equação empírica utilizada na base de cálculos foi a proposta pela AWWA (equação 7 e 8). Em trabalho realizado por Saron e Leite (2001) foi determinada a geração total de sólidos em uma ETA convencional, por meio da utilização de cinco equações empíricas. Os resultados indicaram que não houve diferenças, ao nível de significância de 99%, entre a produção de sólidos determinada empiricamente pelas diversas equações, estatisticamente, apresentando um erro de até 1% em relação à sua média. Demonstrando que a utilização de equações empíricas não apresenta grandes diferenças entre si, na determinação da massa de sólidos.

American Water Work Association, AWWA (1987)

$$P = 3,5 \times 10^{-3} \times T_u^{0,66} \quad (7)$$

$$P_s = 86400 \times P \times Q \quad (8)$$

em que:

P = produção de sólidos (kg de matéria seca por m³ de água tratada);

Tu = turbidez da água bruta (uT);

P_s = produção de sólidos seco (kg.d⁻¹);

Q = vazão de água bruta a ser tratada (m³.s⁻¹)

A medição *in loco* da massa de lodo produzida nos decantadores foi realizada coletando-se amostras da torta de lodo concentrada nos decantadores na etapa anterior à sua higienização (lodo da segunda amostragem), para a determinação da massa de sólidos na

amostra. A partir das dimensões do decantador e medidas da altura de lodo acumulada, obteve-se o volume total de lodo produzido no período. Estas informações foram fornecidas pelo químico responsável pela operação da ETA.

5.1.2 Fase II – Caracterização Qualitativa

A caracterização qualitativa do lodo proveniente da ETA de São Gabriel remeteu à análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Na primeira coleta de lodo, uma pequena alíquota do material foi devidamente armazenada e conservado, sendo para este, analisado os parâmetros de caracterização. O restante do lodo foi armazenado em recipientes de 20 litros para o transporte e posteriormente homogeneizado em um galão de 200 litros e utilizado nos ensaios em teste de jarros e de adensamento, este fato deve ser considerado, pois à diferença entre a concentração de sólidos de ambas as amostras.

A segunda coleta de lodo ocorreu durante a higienização dos decantadores, sendo o material coletado, também armazenado em recipiente de 20 litros, durante o transporte, e posteriormente homogeneizado com água de diluição correspondente a da lavagem dos decantadores. Posteriormente foram analisados os referidos parâmetros e utilizado o lodo nos ensaios em teste de jarros e adensamento. Devido o prazo para a análises dos parâmetros microbiológicos, estes não puderam ser analisados na amostra da segunda coleta, mas deve-se salientar que no decorrer da realização dos ensaios de adensamento foram monitoradas as características físico-químicas do lodo, acompanhando a biodegradabilidade do resíduo durante o decorrer do tempo.

Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados nas amostras de lodo foram os seguintes: Potencial Hidrogeniônico (pH); condutividade; sólidos totais (ST); sólidos totais fixos (STF); sólidos totais voláteis (STV); sólidos em suspensão (SST); sólidos em suspensão fixos (SSF); sólidos em suspensão voláteis (SSV); coliformes totais; *Escherichia coli*; demanda química de oxigênio (DQO); demanda bioquímica de oxigênio (DBO). As determinações seguiram os procedimentos descritos por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012), de acordo com a tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros e métodos analisados na caracterização qualitativa do lodo.

Parâmetro	Método	Método de Referência (APHA et al., 2012)	Equipamentos utilizados
pH	Método eletrométrico	4500-H ⁺ B	Peagâmetro digital (inoLab)
Condutividade (µS/cm)	Potenciométrico	2510 B	Condutivímetro (mCA – 150 P, AAKER)
Série de Sólidos (mg/L)	Gravimétrico	2540 B, 2540 D, 2540 E e 2540 G	Bomba de Vácuo (NEW PUMP), Estufa e Mufla Laboratorial
Coliformes Totais e <i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)	Substrato Cromogênico – Colilert	9223 B	Seladora (Quanti TraySealer) e Incubadora (EletroLab)
DQO (mg/L)	Oxidação por dicromato de potássio em meio ácido reciclo fechado	5220 D	Espectrofotômetro (Modelo V – 1600, Pró-Análise) e Digestor (DRY-BLOCK SL – 25/16, SOLAB)
DBO (mg/L)	Winckler adaptado para azida	5210 B	Incubadora (EletroLab, modelo EL 101/3E)

Fonte: Adaptado APHA et al., 2012.

5.2 ETAPA II - CLASSIFICAÇÃO DOS LODOS DA ETA SEGUNDO A NBR 10.004/04

Para a classificação do lodo da ETA de São Gabriel segundo a NBR10.004/04 utilizou-se lodo proveniente da segunda campanha de amostragem, a fim de se obter uma amostra mais representativa do lodo acumulado nos decantadores. Posterior a realização da coleta, amostras de lodo foram secas em estufa laboratorial e encaminhada para laboratório devidamente credenciado, onde realizaram-se os ensaios correspondes aos testes de lixiviação e solubilização, com emissão de laudo sobre os parâmetros descritos na NBR 10.004/2004. Os parâmetros analisados são apresentados no quadro do anexo A.

5.3 ETAPA III – ENSAIOS EM TESTE DE JARROS PARA AVALIAÇÃO DOS POLÍMEROS

Foram realizados ensaios em Teste de Jarros para avaliar o desempenho de cinco polímeros com características distintas: Polímero Aniônico com média densidade da carga; Polímero Não-Iônico com muito alta densidade da carga; Polímero Catiônico com alta densidade da carga (Catiônico – A); Polímero Catiônico com baixa densidade da carga (Catiônico – B); e Polímero Catiônico com muito baixa densidade da carga (Catiônico – MB).

Com o objetivo de evitar comparações entre polímeros fabricados por diferentes fornecedores, todos os polímeros utilizados foram doados por um único distribuidor, a empresa Novatek©. As principais especificações dos diferentes tipos de polímeros sintéticos utilizados no processo de floculação do lodo podem ser observadas na tabela 9, as variações das características dos polímeros remetem ao tipo iônico, densidade da carga e peso molecular.

Tabela 9 - Características dos diferentes tipos de polímeros sintéticos utilizados.

Tipo Iônico	Tipo de Polímero	Forma	Densidade da carga	Peso Molecular
Aniônico	Novaflok P-22	Cristais	Média	Muito Alto
Não iônico	Novaflok P-20	Cristais	Muito elevada	-
Catiônico	Novaflok P-3300	Emulsão	Alta	Alto
Catiônico	Novaflok P-2700	Cristais	Baixa	Muito Alto
Catiônico	Novaflok P-2900	Cristais	Muito Baixa	Muito Alto

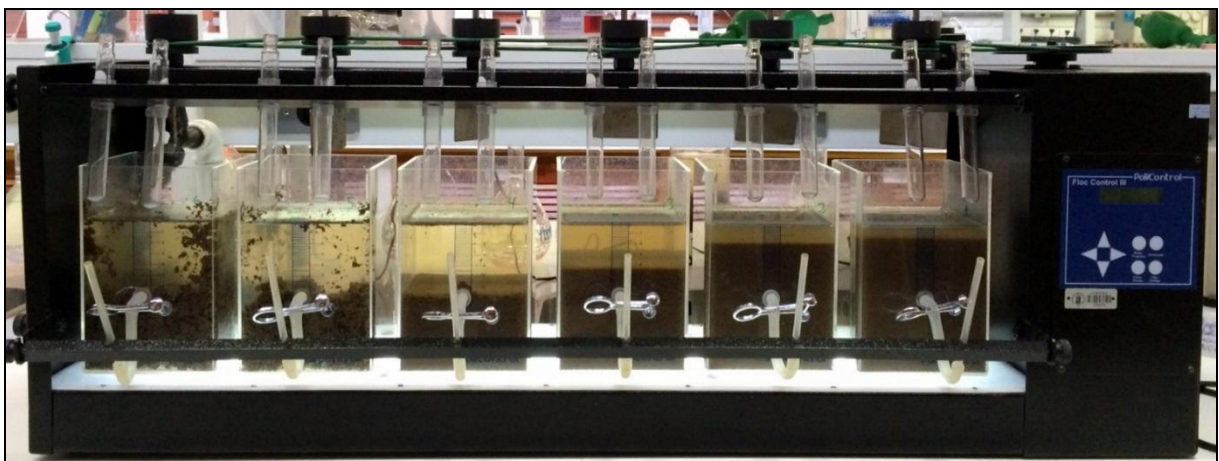
Foram realizados ensaios em teste de jarros para o lodo coletado em ambas amostragens, sendo que para o lodo coletado na segunda campanha os ensaios foram realizados em triplicata, para cada dosagem dos diferentes tipos de polímeros.

O equipamento de Teste de Jarros, da marca PoliControl, é composto por seis jarros, com capacidade individual de dois litros, sendo estes de acrílico transparente, de base quadrada, com dimensões internas de 155mm x 155mm e com graduação em centímetros. Os agitadores são de aço inox com paleta de eixo vertical e com dimensões de 25 mm x 75 mm. O sistema dosador de produtos químicos é composto por suporte com 12 cubetas de vidro, que permitem a dosagem simultânea.

O equipamento é acionado por meio de sistema mecânico de polias, tracionado por correia interligada a motor elétrico dotado de caixa redutora, o qual obter rotações estáveis entre 15 a 490 rpm, que corresponde ao gradiente de velocidade de 15 a 1200 s⁻¹. A rotação do equipamento, para a mistura rápida e lenta, foi ajustada por programação automática na elaboração dos ensaios, as quais foram realizadas a partir de adaptações dos tempos e gradientes de velocidade utilizados nos estudos de Scalize e Di Bernardo (1998) e Zhao (2004a). Ainda deve-se considerar que quando utiliza-se polímeros para promover a floculação os gradientes de misturas não são essenciais para promover uma boa floculação, pois não ocorre reações competitivas, com adsorção dos colóides e precipitação dos hidróxidos (AMIRTHARAJAH, 1989), não sendo fator decisivo na floculação do lodo.

O preparo das soluções de polímeros seguiu o descrito por Dentel, Abu-orf e Griskowitz (1993). Nos ensaios de floculação foram avaliadas dosagens dos diferentes tipos de polímeros, a faixa das diferentes dosagens foi escolhida com base na literatura, sobre trabalhos de tratamento de lodos de ETAs. Assim, foram avaliadas dosagens entre 0 a 6 mg pol/g SST, na figura 15 pode-se visualizar a realização de um ensaio no equipamento de teste de jarro.

Figura 15 - Ensaios em Teste de Jarros com Polímero Catiônico com alta densidade da carga, com variações de dosagens de 5, 4, 3, 2, 1 e 0 mg pol/g SST.



Fonte: Autor.

Os ensaios de coagulação e floculação foram realizados seguindo a programação descrita no quadro 3, de acordo com os procedimentos:

- a) Adicionar o volume de polímero corresponde a dosagem requerida, nos frascos de dosagem simultânea;
- b) Encher os jarros com o lodo da ETA, a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$);
- c) Ligar o equipamento já ajustado à rotação com controle automático, para a agitação rápida e lenta;
- d) Homogeneizar a amostra e adicionar nos jarros os volumes correspondentes as dosagens dos polímeros, com auxílio do suporte de dosagem simultânea;
- e) Contagem automática do teste de jarros, para a mistura rápida e lenta;
- f) Término do processo de floculação, após 10 minutos de sedimentação coleta do sobrenadante.

Quadro 3 - Programação no teste de jarros com controle automático e tempos no cronômetro e respectivas ações.

Programação no Teste de Jarros	Tempos e Ações
Rotação 1 = 436 rpm (1000 s^{-1}) Tempo 1 = 10 segundos	0'0'' – Ativar o cronometro
Rotação 2 = 436 rpm (1000 s^{-1}) Tempo 2 = 10 segundos	0'10'' – Adicionar a dosagem do polímero; 0'20'' – Fim da mistura rápida.
Rotação 3 = 51 rpm (40 s^{-1}) Tempo 3 = 1 minuto	0'20'' – Início da mistura lenta; 1'20'' – fim da floculação (aparelho desligado).
Rotação 4 = 0 rpm Equipamento desligado.	11'20'' – coleta do sobrenadante.

Ao término do período de sedimentação o sobrenadante clarificado foi coletado com o auxílio de pipeta de pasteur, em beakers de vidro de 50 mL, teve-se o devido cuidado para não pipetar sólidos, os quais interferem na leitura da turbidez. A partir dos ensaios em teste de jarros e avaliação da turbidez remanescente da água clarificada, definiu-se os polímeros e respectiva faixa de dosagem utilizada nos ensaios de adensamento do lodo por sedimentação e FAD.

5.4 ETAPA IV - ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO

Os ensaios de adensamento foram realizados em lodo coletado em ambas as amostragens, a partir dos resultados obtidos no teste de jarros. Os ensaios provenientes da

primeira coleta (ensaios preliminares), tiveram como principal objetivo investigar os processos de flotação e sedimentação do lodo da ETA de São Gabriel. Já os ensaios da segunda coleta (ensaios experimentais) foram mais representativos, pois foram realizados em triplicata, e sendo coletado durante a higienização dos decantadores.

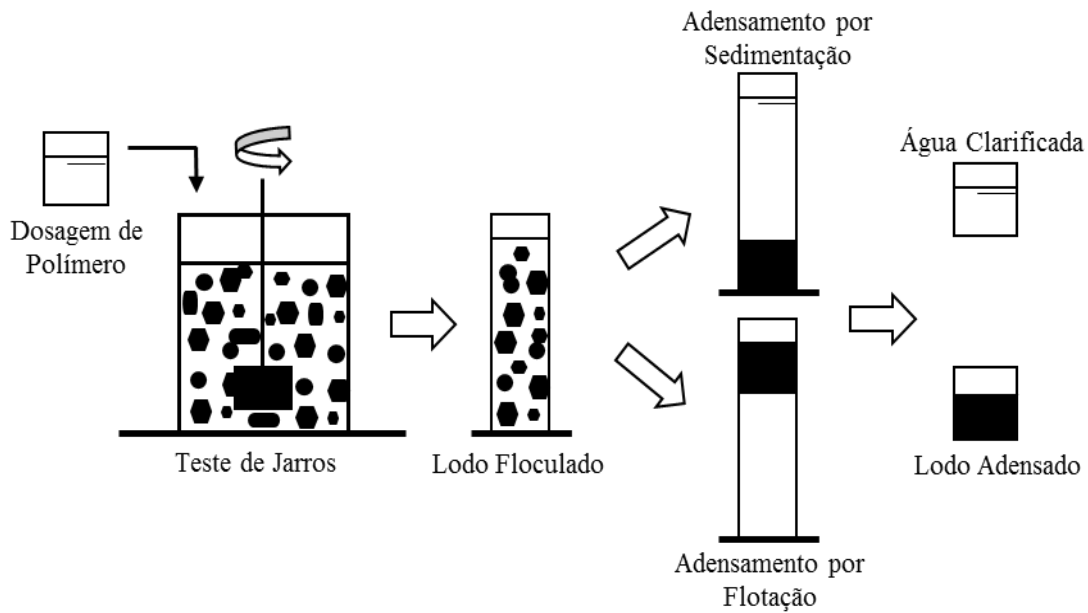
Visando a melhor compreensão dos resultados, os ensaios foram divididos entre as campanhas de amostragem, ensaios preliminares de adensamento (primeira amostragem) e ensaios experimentais de adensamento (segunda amostragem). Seguiu-se o mesmo procedimento metodológico entre os ensaios de adensamento.

A partir dos resultados dos ensaios em teste de jarros foram escolhidos dois tipos de polímeros para realizar a floculação do lodo, e posteriormente os ensaios de adensamento. Os polímeros selecionados para a realização dos ensaios foram: Polímero Não-Iônico com muito alta densidade da carga (primeira campanha); Polímero Aniônico com média densidade da carga (segunda campanha); Polímero Catiônico com muito baixa densidade da carga (primeira e segunda campanha). As dosagens dos respectivos polímeros variaram entre 0 a 5,5 mg pol/g SST.

Durante a realização dos ensaios de adensamento do lodo foi monitorada concentração de sólidos do lodo bruto, para o lodo coletado na segunda amostragem. A fim de manter as características iniciais para todos os ensaios, quando necessário adicionava-se um volume de água no lodo, visando manter a concentração inicial de sólidos constante durante os ensaios.

Para a adição e mistura dos polímeros nos ensaios de adensamento foram seguidas às programações realizadas no Teste de Jarros, com: agitação rápida de 10 segundos a 436 rpm (posterior a adição do polímero), seguida de agitação lenta de 51 rpm por 1 minuto. Após a floculação realizada no teste de jarros o lodo foi cuidadosamente transferido para a coluna de sedimentação ou de flotação, dependendo do processo de adensamento realizado. Na figura 16 está ilustrado esquematicamente como foi realizado o procedimento de floculação e adensamento do lodo, seguindo metodologia indicada por Zhao (2004a).

Figura 16 - Procedimento esquemático da floculação e adensamento do lodo, realizados em escala de bancada.



Fonte: Autor.

Para avaliar a eficiência dos tratamentos de adensamento por sedimentação e por flotação a ar dissolvido foram analisados os seguintes parâmetros: turbidez (da água clarificada); sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos em suspensão, sólidos em suspensão fixos e sólidos em suspensão voláteis (série de sólidos), no lodo adensado.

Para determinar a eficiência dos tratamentos, e caracterizar o lodo adensado, foram coletadas amostras compostas ao final de cada uma das três repetições dos ensaios (ensaios experimentais), as quais foram homogeneizadas, e posteriormente submetidas às análises referentes à série de sólidos (APHA et al., 2012) e resistência específica, com a amostra compostas de cada ensaio de adensamento. A determinação de turbidez foi realizada de acordo com APHA et al. (2012).

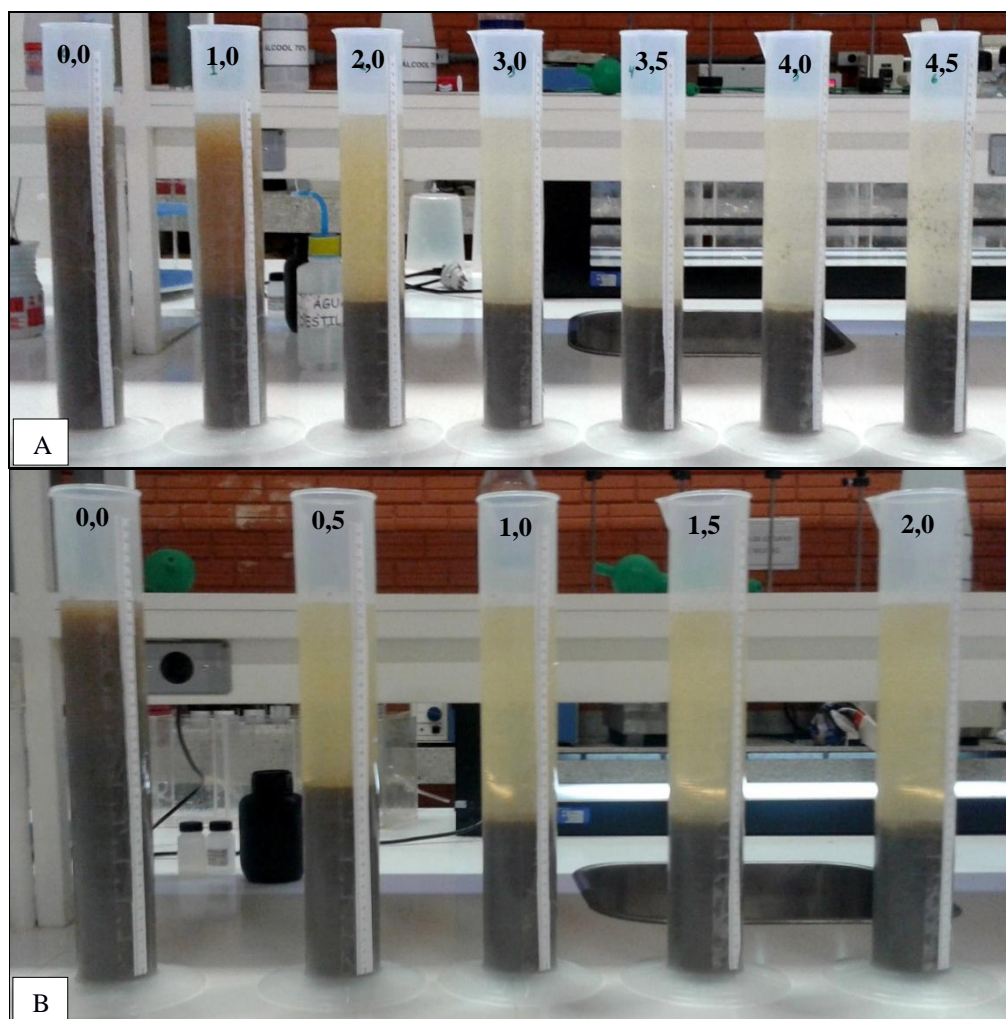
5.4.1 Fase I: Adensamento por sedimentação

Os ensaios de adensamento por sedimentação foram realizados em proveta graduada de 1 litro. Após adição dos agentes floculantes e agitação do lodo, conforme programação determinada em teste de jarros, deu-se início ao ensaio de adensamento. A duração do ensaio

foi de 360 minutos, onde a interface lodo adensado/água clarificado permaneceu aproximadamente constante. No decorrer do processo de adensamento foram realizadas leituras da interface lodo/água clarificada ao longo do tempo de sedimentação, para a determinação das velocidades de sedimentação.

Nos ensaios de adensamento da primeira etapa a dosagem do polímero catiônico com muito baixa densidade da carga foi de 0 a 4,5 mg pol/g SST, e para o polímero não-iônico com muito alta densidade da carga a dosagens variou de 0 a 2 mg pol/g SST, a realização de ambos os ensaios pode ser observada na figura 17 (A e B). As faixas das dosagens dos distintos polímeros foi escolhida a partir dos ensaios em teste de jarros.

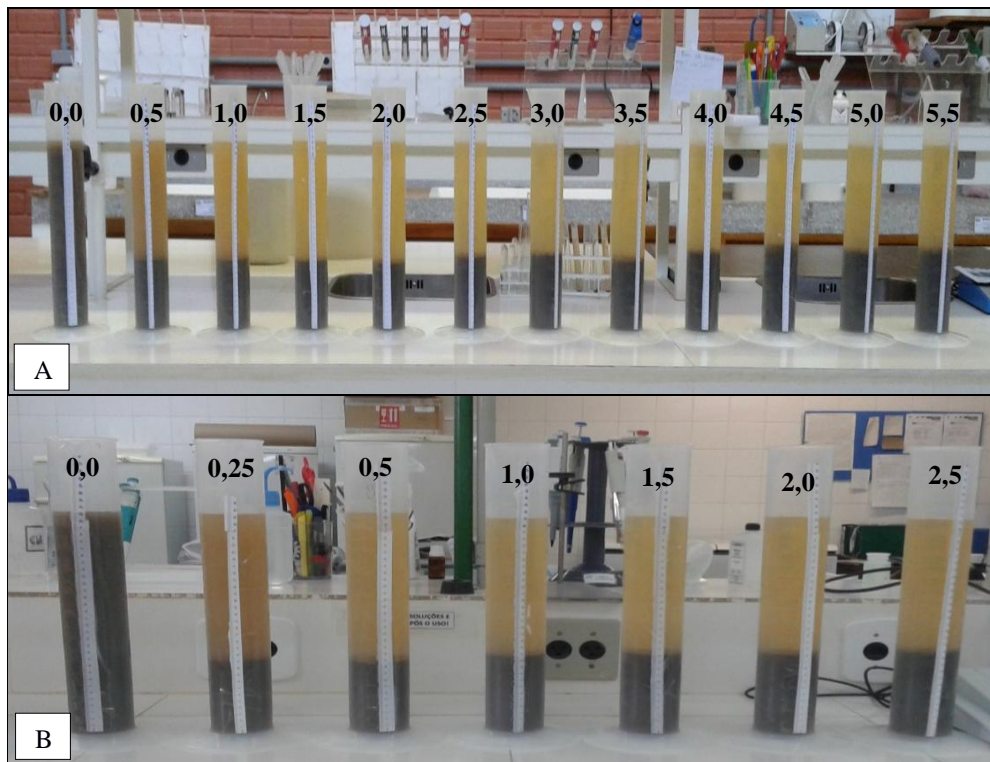
Figura 17–Imagem ilustrativa do experimento de sedimentação após 360 minutos de ensaio. A - Polímero Catiônico MB, com dosagens em mg pol/g SST. B - Polímero Não-Iônico, com dosagens em mg pol/g SST.



Fonte: Autor.

Para os ensaios de adensamento com lodo proveniente da segunda coleta a dosagem do polímero catiônico com muito baixa densidade da carga variou entre 0 a 5,5 mg pol/g SST, e a dosagem de 0 a 2,5 mg pol/g SST foi aplicada nos ensaios com polímero aniônico com muito média densidade da carga. A realização dos ensaios pode ser visualizada na figura 18 (A e B). As faixas das dosagens dos distintos polímeros foi escolhida a partir dos ensaios em teste de jarros.

Figura 18–Imagem ilustrativa do experimento de sedimentação após 360 minutos de ensaio. A - Polímero Catiônico MB, com dosagens em mg pol/g SST. B - Polímero Aniônico, com dosagens em mg pol/g SST. 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; e 2,0 mg pol/g SST.



Fonte: Autor.

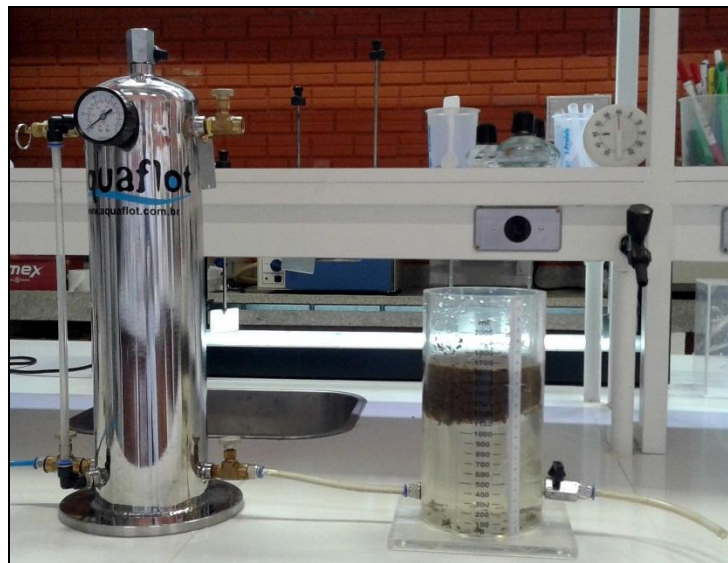
Após finalizar ambos os ensaios de adensamento por sedimentação, realizaram-se as determinações descritas no item 5.4. Para os ensaios experimentais de adensamento (lodo da segunda coleta) ainda foram determinadas as velocidades de sedimentação e a resistência específica.

5.4.1 Fase II: Adensamento por flotação por ar dissolvido (FAD)

Os ensaios de adensamento por FAD foram realizados em coluna de flotação por ar dissolvido (flotateste) com alimentação por batelada (figura 19). O flotador, marca Aquafлот®, possui capacidade de 3 litros no vaso saturar e de 2 litros para a célula de flotação. Visando à obtenção da curva de adensamento por flotação o jarro foi devidamente graduado.

A câmara de saturação foi preenchida com água e pressurizada por meio de ar comprimido (proveniente de compressor de ar) por um período mínimo de 20 minutos, obtendo-se água pressurizada e saturada por ar dissolvido. A pressão de saturação desejada foi determinada pelo filtro regulador de pressão, respeitando o limite de 6 kgf.cm² (~ 0,6 MPa ou 6 atm).

Figura 19 - Ensaio de adensamento por flotação a ar dissolvido em flotador de bancada, com 4,5 mg pol/g SST de polímero catiônico - MB.



Fonte: Autor.

Posteriormente à floculação, o lodo foi transferido para a célula de flotação, dando-se início aos ensaios de adensamento por FAD. A graduação da célula de flotação teve como referência a base da coluna, sendo acompanhada a altura da interface lodo/água clarificada, para determinação da velocidade de ascensão. A duração do ensaio de adensamento por FAD foi de no máximo 30 minutos, período que a interface lodo/água clarificada permaneceu constante.

Para os ensaios de adensamento do lodo por FAD foram utilizadas diferentes dosagens dos cinco tipos de polímeros, para o lodo coletado na primeira amostragem. Contudo o polímero catiônico com muito baixa densidade da carga foi o que apresentou resultado satisfatório para a flotação completa, sendo utilizado dosagens que variaram de 0 a 5,5 mg pol/g SST.

Além do tipo e dosagem do agente flocculante, nos ensaios de adensamento por flotação por ar dissolvido, foram avaliadas as condições operacionais de flotação por ar dissolvido (Pressão de Saturação, Taxa de Reciclo). A pressão de saturação (P_{sat}) foi avaliada para o lodo da primeira coleta, onde foram testadas as pressões de 0,5; 0,55 e 0,6 MPa (ou 5; 5,5 e 6 atm). A taxa de recirculação (Tr) foi avaliada para o lodo da segunda, testando as Tr de 30, 40 e 50%.

A taxa de recirculação é calculada em função do volume de água de recirculação introduzida no jarro (V_r) dividido pelo volume do mesmo ($2L = 2000$ mL), como mostra a equação 11. Para controlar a quantidade de água a ser introduzida, é marcado o aumento do nível de água no interior do jarro após a introdução da água saturada. Para o cálculo do acréscimo na altura de água no jarro (hr), utiliza-se a equação 12, onde consideram-se as dimensões internas do jarro ($d = 10,5\text{cm} \rightarrow \approx 86,6 \text{ cm}^2$) e o volume de água a ser introduzido (V_r) volume respectivo a taxa de recirculação.

$$Tr = \frac{V_r}{2000} \text{ ou } V_r = 2000.Tr \quad (11)$$

$$hr = \frac{V_r}{86,6} = \frac{2000.Tr}{86,6} \quad (12)$$

Em que:

Tr = taxa de recirculação (%);

V_r = volume de água de recirculação (mL);

hr = altura adicional devido a água de recirculação (cm).

Finalizados os ensaios de adensamento por FAD também foram realizadas as determinações dos parâmetros descritos no item 5.4. Para o lodo coletado na segunda amostragem (ensaios experimentais) também foram determinadas as velocidades de ascensão e resistência específica.

5.4.2.1 Avaliação da concentração de sólidos no processo de adensamento por FAD

A capacidade de flotação do lodo frente a diferentes concentrações de sólidos foi monitorada com o lodo coletado na segunda amostragem. A partir da torta de lodo coletada nos decantadores da ETA, foram preparados lodos com diferentes diluições em água, os quais corresponderam a concentrações de sólidos de: 18.953 mg.L⁻¹, 25.190 mg.L⁻¹ e 49.550 mg.L⁻¹.

Nos ensaios de flotação com os lodos de diferentes concentrações de sólidos foram mantidas a taxa de reciclo (40%), pressão de saturação (6 atm) e dosagem do polímero (4,5 mg pol/g SST). Os ensaios foram realizados em triplicata, sendo avaliada a turbidez remanescente da água clarificada e a capacidade de flotação para o lodo com distintas concentrações de sólidos.

5.4.3 Curva e velocidade de Clarificação/Adensamento por Sedimentação e FAD

A partir dos ensaios de adensamento em batelada, por sedimentação e FAD, foram feitas as curvas de adensamento, a partir das quais foi determinada a velocidade de sedimentação e de ascensão, fornecendo parâmetros necessários para a construção de unidades de clarificação/adensamento. A velocidade de clarificação foi determinada apenas nos ensaios realizados com o lodo da segunda coleta. A velocidade de clarificação máxima é determinada quando a interface água clarificado/lodo adensado permanece constante, em um tempo t_1 inicial a um instante t_2 . Neste intervalo, o segmento de reta e a velocidade de clarificação é dada pelo coeficiente angular (BARROSO, 2007).

Para exemplificar, a partir da curva obtida nos ensaios de adensamento, os procedimentos adotados para o cálculo da velocidade de clarificação consistem em (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011):

- Ligar os pontos relativos aos dados experimentais, a partir da altura da interface de clarificação (A), até encontrar o eixo horizontal, correspondente ao tempo do ensaio (B);
- O coeficiente angular da reta AB será igual à velocidade de clarificação (V_{cla}) ou deslocamento da interface, dado pela equação 13.

$$V_{cla} = \frac{OA}{OB} \quad (13)$$

A velocidade clarificação/adensamento por flotação foi obtida de forma similar à do adensamento por sedimentação, onde adotou-se por referência a base inferior da coluna de

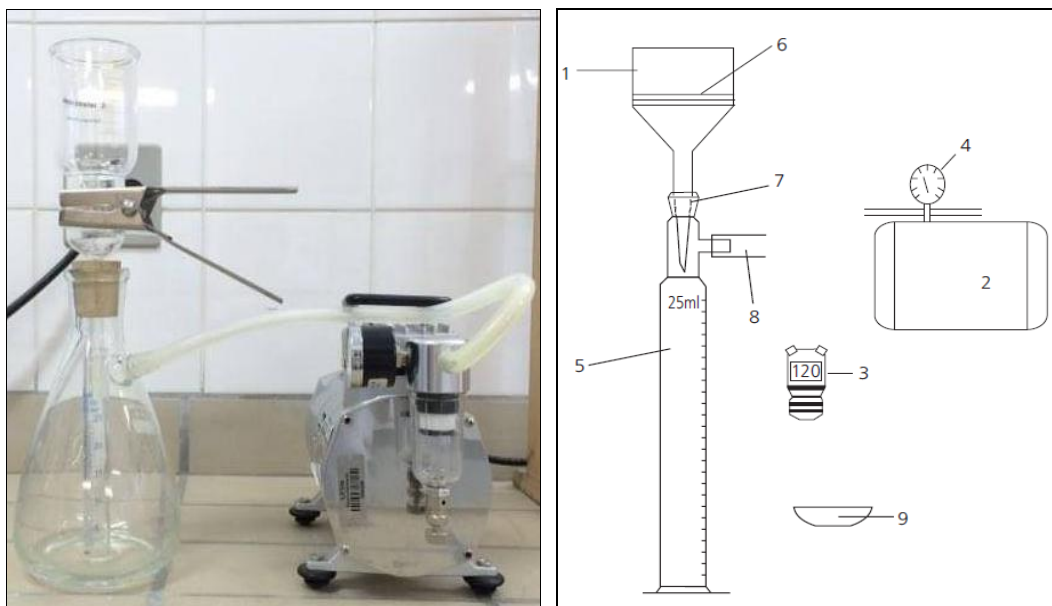
flotação, de forma inversa aos ensaios em coluna de sedimentação. Determinando-se as alturas da interface de clarificação em função do tempo percorrido após o início do ensaio.

A velocidade de clarificação foi obtida a partir dos dados dos ensaios de adensamento do lodo coletado na segunda amostragem, sendo determinada para as três repetições de cada tratamento.

5.4.4 Resistência Específica

Com o intuito de avaliar a resistência a filtração do lodo adensado, por sedimentação e por FAD, foram realizados ensaios de resistência específica para os tratamentos realizados com lodo proveniente da segunda coleta. Os ensaios de resistência específica do lodo foram realizados de acordo com metodologia descrito por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), com base no teste do tempo de filtração descrito por APHA et al. (2012). Na figura 20 está ilustrado o equipamento utilizado para a determinação da resistência específica.

Figura 20 - Equipamentos utilizados para determinação da resistência específica. 1) funil de Buchner nº2; 2) bomba a vácuo; 3) cronômetro; 4) medidor de vácuo (manômetro); 5) proveta graduada com dispositivo para a tomada de vácuo; 6) filtro de papel *Whatman 42*; 7) anel de borracha vedante para funil Bucner; 8) mangueira para ligar a proveta a bomba; e 9) cadinho de porcelana.



Fonte: Autor e adaptado de Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011).

Em cada ensaio de resistência específica utilizaram-se 25 mL de lodo proveniente do tratamento por adensamento. Os procedimentos adotados para o ensaio de resistência específica consistiram em:

- Colocar o papel filtro no interior do funil de Buchner e molhá-lo com 20 mL água destilada, acomodá-lo em um cadinho de porcelana, e levar para uma estufa laboratorial a 100 °C por 2 horas;
- Retirar o material da estufa, colocar em um dessecador, esperar esfriar e fazer a pesagem inicial;
- Após pesagem, o filtro de papel foi acoplado no funil de Burchner e umedecido com água destilada, em seguida aplicou-se vácuo (380 mmHg);
- Adicionou-se 25 mL de lodo no funil e aplicou-se vácuo no sistema, registrando-se em função do tempo o volume do filtrado. A partir dos valores de tempo pelo volume (t/v) em função do volume (v) construindo-se gráfico para a obtenção do coeficiente b (equação 2) utilizado no cálculo da resistência específica (equação 1). Após o término da filtração o ensaio foi encerado;
- O filtro de papel com os sólidos retidos foi inserido novamente no cadinho de porcelana, e levados para a estufa a 100 °C durante 2 horas;
- Após estar seco e frio o papel filtro foi pesado e, a diferença entre o peso inicial e o peso final forneceu a massa seca de sólidos totais utilizada no cálculo de resistência específica, empregados na equação 1.

A viscosidade do filtrado foi determinada por meio de viscosímetro de Oswald, realizada em banho de água, visando manter a temperatura constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, como ilustrado na figura 21.

Figura 21 - Determinação da viscosidade do filtrado, por meio de viscosímetro de Oswald, em banho de água, visando manter a temperatura constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.



Fonte: Autor.

5.4.5 Comparação entre o adensamento por sedimentação e por FAD

A comparação entre o adensamento por sedimentação e por flotação a ar dissolvido foi realizada através de avaliação dos resultados obtidos nos ensaios com o lodo provenientes da segunda campanha de amostragem. Foram realizadas análises estatísticas para os 29 ensaios de adensamento do lodo da ETA em estudo, sendo os tratamentos por: sedimentação sem utilização de polímero; sedimentação com utilização de polímero catiônico - MB (dosagens de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST); sedimentação com utilização de polímero aniônico (dosagens de 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5mg pol/g SST); flotação com P_{sat} de 6 atm e Tr de 40% (dosagens de 0; 3,5; 4,0; 4,5; e 5,0 mg pol/g SST); e flotação com P_{sat} de 6 atm e Tr 50% (dosagens de 0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST).

Para os parâmetros turbidez, concentração de sólidos e velocidade de sedimentação foi aplicado o teste estatístico *one way* (delineamento inteiramente casualizado – DIC), e para o parâmetro resistência a filtração foram realizadas comparações entre os ensaios.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ETAPA I - CARACTERIZAÇÃO DO LODO GERADO NA ETA DE SÃO GABRIEL

A caracterização do lodo da ETA de São Gabriel foi realizada por meio de parâmetros quantitativos (Fase I) e qualitativos (Fase II), os resultados pertinentes a cada fase são apresentados nos itens 6.1.1 e 6.1.2.

6.1.1 Fase I - Caracterização quantitativa

A quantificação da massa de lodo gerado nos decantadores da ETA de São Gabriel foi realizada com base em equação empírica e medição *in loco*. A massa total de lodo gerado na ETA, durante o período de Julho de 2014 a Junho de 2015, foi calculada utilizando valores médios da turbidez da água bruta e o volume mensal de água tratada na ETA.

A massa de lodo produzida nos decantadores pode ser observada na tabela 10, e figuras 22 e 23. A massa mensal de lodo produzida na ETA em estudo, variou entre 14,9 toneladas (janeiro de 2014) a 7,8 toneladas (fevereiro de 2015). Com média mensal de 11,8 toneladas e acumulado de 141,3 tonelada, durante o período analisado.

Tabela 10 - Produção de lodo da ETA de São Gabriel, e dados de turbidez da água bruta e volume mensal tratado, no período de julho de 2014 a junho de 2015.

Meses	Volume Tratado (m ³)	Turbidez da Água Bruta (NTU)			Produção de Lodo (g matéria seca/m ³ de água tratada)	Produção de Lodo (Toneladas/Mês)
		Mín.	Méd.	Máx.		
Jul. -14	272.433	31,8	64,7	276	54,8	14,9
Ago. - 14	276.960	23,1	44,2	401	42,7	11,8
Set. - 14	253.872	35,4	70,1	217	57,8	14,7
Out. - 14	292.344	30,0	53,2	174	48,2	14,1
Nov. - 14	286.044	23,3	33,1	159	35,2	10,1
Dez. - 14	311.300	22,2	38,6	303	39,0	12,2
Jan. - 15	313.672	23,2	39,0	161	39,3	12,3
Fev. - 15	283.752	16,0	22,7	68,7	27,5	7,8
Mar. - 15	308.160	13,7	25,4	110	29,6	9,1
Abr. - 15	287.064	17,6	24,5	65	28,9	8,3
Mai. - 15	302.585	18,0	42,9	180	41,8	12,7
Jun. - 15	292.351	28,6	49,1	531,9	45,7	13,4
Mínimo					27,5	7,8
Média					40,9	11,8
Máximo					57,8	14,9
Total					490,7	141,3
Desvio Padrão					7,6	2,0

Figura 22 - Massa de lodo mensal produzida de julho de 2014 a junho de 2015.

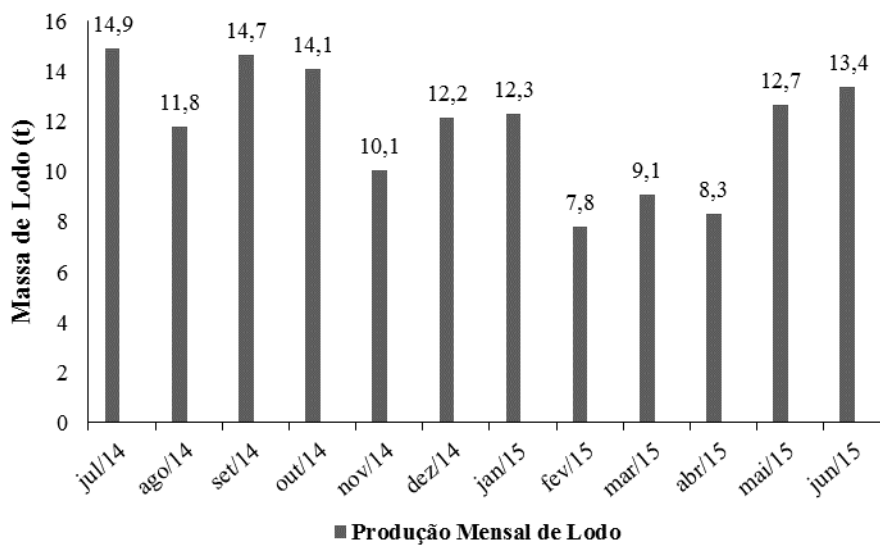
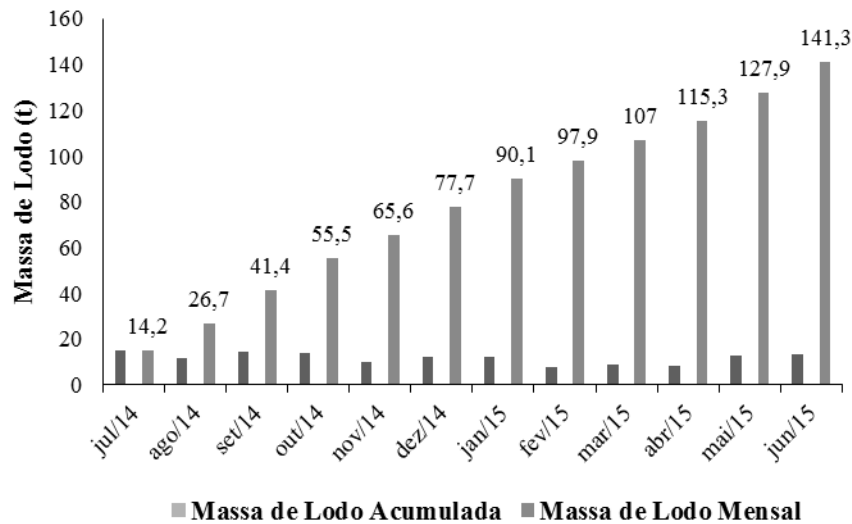


Figura 23 - Massa mensal de lodo produzida e valor acumulado durante o período de julho de 2014 a junho de 2015.



A produção da massa de lodo estimada *in loco*, foi realizada a partir da determinação da altura da camada de lodo acumulada nos decantadores e concentração de sólidos na amostra. A altura medida de lodo acumulado nos decantadores foi de 0,8 metros, os quais ficam acumulados a um terço do comprimento do decantador. Tendo como base as dimensões de cada decantador (9,2 metros de largura por 38 metros comprimento), obtém-se uma área total de 349,6 m² para cada decantador, sendo um terço do decantador correspondente a 116,8 m². Deste modo, atinge-se um volume total de lodo de 93,4 m³ acumulado em um decantador durante o período de 65 dias. Considerando 30 dias o volume é de 43,1 m³.

A concentração média de sólidos totais das amostras de lodo acumulado no decantador foi de 129,19 g.L⁻¹, tomando por base o volume de lodo acumulado no período de 30 dias (43,1 m³), calcula-se a quantidade de sólidos em termos de massa seca acumulada nos dois decantadores da ETA de São Gabriel, obtendo-se 11,1 toneladas.

Apesar do período utilizado para o cálculo da massa de lodo, pela equação empírica, diferir do mês em que foi realizado a medição *in loco*, o valor correspondente a média do período calculado pela equação empírica (11,8 toneladas) é próximo ao obtido na medição *in loco* (11,1 toneladas), com desvio padrão médio de 0,35. Estes valores diferem do determinado por outros autores (RIBEIRO, 2007; KATAYAMA, 2012), onde a determinação da massa de lodo por equações empíricas se diferiu do estimado por outros métodos.

6.1.2 Fase II – Caracterização qualitativa do lodo

As características qualitativas dos lodos das ETAs podem ser afetadas por uma série de fatores, mas principalmente em função da qualidade da água bruta, da dosagem e produtos químicos utilizados e forma de limpeza dos decantadores. A análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicas foram realizados nas duas campanhas de amostragem. Na tabela 11 estão os resultados da caracterização do lodo proveniente da primeira e segunda coleta.

Tabela 11 - Características físico-químicas e microbiológicas do lodo das amostras coletadas em agosto/2015 (Amostra 1) e novembro/2015 (Amostra 2).

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2
DBO_{5,20°C} (mg.L⁻¹)	375	211
DQO (mg.L⁻¹)	10.318	5.951
DBO/DQO	0,036	0,035
pH	5,7	6,6
Condutividade (µScm⁻¹)	87,8	149,2
Coliformes (NMP/100 ml)	4.48E+05	-
<i>E. Coli</i> (NMP/100 ml)	1.85E+05	-
ST (mg.L⁻¹)	44.757	22.325
STF (mg.L⁻¹)	33.175	17.174
STV (mg.L⁻¹)	11.582	5.151
SST (mg.L⁻¹)	41.408	21.700
SSF (mg.L⁻¹)	31.990	16.425
SSV (mg.L⁻¹)	9.418	5.275

Os dados do lodo da ETA em estudo, mostrados na Tabela 11, indicam elevado teor de material não biodegradável (inerte), o que fica evidenciado pela alta demanda bioquímica de oxigênio (10.318 e 5.951 mg.L⁻¹) e baixa relação DBO/DQO (0,036 e 0,035), apresentando alta fração inerte. Cordeiro (1993), afirma que independente da qualidade da água, geralmente a DQO de lodos de decantadores apresenta valores bem superiores aos da DBO.

Em trabalho realizado por Vanacôr (2005) a relação DBO/DQO para lodo de decantador que utilizava como coagulante *Veta organic*, foi de 0,07 para lodo líquido (correspondente a primeira fase de limpeza) e 0,10 para lodo pastoso (lodo impregnado nas paredes do decantador). Segundo o autor, o alto teor de matéria orgânica apresentado no lodo estudado se deve ao coagulante orgânico utilizado no tratamento da água bruta. Esta realidade não se aplica ao lodo da ETA de São Gabriel, a qual utiliza coagulante sintético (PAC) para o tratamento da água. Geralmente lodos provenientes de água bruta tratada com coagulantes

metálicos, como a ETA de São Gabriel, apresentam um lodo com relação DBO/DQO baixa, ou seja, baixo material orgânico comparado com material inorgânico.

A grande quantidade da fração não biodegradável também é representada pela proporção/porcentagem de STF e SSF e relação os ST e SST, de 74,1% e 76,9% (33.175 e 17.174 mg.L⁻¹) para STF, e de 77,3% e 75,7% (31.990 e 16.425 mg.L⁻¹) para SSF, demonstrando que a fração biodegradável, correspondente aos STV e SSV, é de apenas 25,8% e 23,1% (11.582 e 5.151 mg.L⁻¹) e de 22,7% e 24,3% (9.418 e 5.275 mg.L⁻¹) em relação aos ST e SST, respectivamente. Em trabalho realizado por Nair e Ahammed (2015), o lodo estudado também apresentou predominância de sólidos inorgânicos, indicados pela baixa relação SSV/SS (0,24), situação típica para lodos de estações de tratamento de água.

Lodos de ETAs geralmente apresentam valores aproximados entre ST e SST, pois a maior parte do material particulado se deve a sólidos em suspensão, estes valores ficaram evidenciados no lodo da ETA de São Gabriel, o qual apresentou uma concentração de ST de 44.757 e 22.325 mg.L⁻¹ (teor de sólidos de 4,47% e 2,23%) e concentração de SST de 41.408 e 21.700 mg.L⁻¹ (teor de sólidos de 4,14% e 2,17%).

De acordo com o indicado pela literatura a concentração de sólidos nos lodos de ETAs pode variar consideravelmente, a concentração de SST na remoção mecanizada fica entre 5.000 a 20.000 mg.L⁻¹, enquanto nas descargas hidráulicas este valor varia entre 2.000 a 10.000 mg.L⁻¹ (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011). Porém segundo Richter (2001) os sólidos totais presente nos tanques de decantação podem variar entre 1.000 a 40.000 mg.L⁻¹ (0,1 a 4%). Já segundo Cordeiro (1993) a concentração de sólidos totais dos decantadores pode ser ainda mais alta, podendo em alguns casos variar de 3.000 a 81.575 mg.L⁻¹. A grande diferença entre a concentração de sólidos nos decantadores se deve primordialmente pelo método de limpeza dos mesmos.

O lodo da ETA de São Gabriel apresentou elevada contagem para Coliformes totais, de 4,48E+05 NMP/100 ml, e para *E. Coli*, de 1,85E+05 NMP/100 ml, estes elevados valores podem ser explicados devido ao fato de não ser realizado pré-cloração na ETA antes do tratamento, e devido as características do manancial de captação. Em estudo realizado por Silveira (2012) para diferentes tipos de lodos de ETAs, os resultados para a contagem de coliformes totais variaram de 3,5E+05 para 3,2E+09 NMP/100 ml, e para *E. Coli* foram de 776 a 3E+04 NMP/100 ml.

Para o lodo coletado na segunda campanha de amostragem foram monitoradas as características físico-químicas no decorrer da realização dos ensaios em teste de jarros e de adensamento. Os parâmetros físico-químicos determinados no lodo durante o período de

realização dos ensaios encontram-se na tabela 12. Pode-se observar que o material biodegradável do resíduo teve decréscimo no decorrer dos ensaios, com decomposição da matéria orgânica, evidenciado pela diminuição da relação DBO/BQO.

Tabela 12 - Características físico-químicas do lodo utilizado nos ensaios em teste de jarros e adensamento da segunda campanha, em 25 de novembro/2015 (Amostra 1), 28 de dezembro/2015 (Amostra 2) e 27 de janeiro de 2015 (Amostra 3).

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
DBO_{5,20°C} (mg.L⁻¹)	211	135	124
DQO (mg.L⁻¹)	5.951	5.862	6.820
DBO/DQO	0,035	0,023	0,018
pH	6,6	6,8	6,6
Condutividade (µScm⁻¹)	149,2	186,3	115,4
ST (mg.L⁻¹)	22.325	22.331	22.589
SST (mg.L⁻¹)	21.700	21.955	22.067

Também foram realizadas verificações semanais da concentração de sólidos do lodo bruto, a qual foi mantida entre 22.325 mg.L⁻¹ ($\pm 0,300$ mg.L⁻¹).

6.2 ETAPA II –CLASSIFICAÇÃO DOS LODOS DA ETA DE SÃO GABRIEL SEGUNDO A NBR 10.004/04

O lodo bruto da ETA de São Gabriel, na classificação de resíduos segundo a NBR 10.0004/04 (ABNT 2004a), apresentou como resultado dos parâmetros: cor marrom; estado físico sólido; umidade de 16,3%; ausente de líquidos livres; ausente de inflamabilidade; pH 1:1 de 6,00 \pm 0,018 UpH; óleos e graxas < 0,100 %; sulfetos < 1,0 mg/kg; cianetos < 1,0 mg/kg.

O extrato lixiviado resultou em um volume de 990 cm³ e pH de 4,9 \pm 0,015, já o extrato solubilizado obteve pH de 6,6 \pm 0,02. Os resultados dos parâmetros analisados nos extratos lixiviados e solubilizados do lodo da ETA de São Gabriel são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos parâmetros analisados, nos extratos lixiviados e solubilizados e valores especificados na NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a).

Parâmetros Analisados	Unidade	Valores Encontrados	Especificação NBR 10.004 (2004) Anexo F
Extrato Lixiviado			
Arsênio (As)	mg.L ⁻¹	<0,005	1,00
Bário (Ba)	mg.L ⁻¹	1,41 ± 0,023	70
Cádmio (Cd)	mg.L ⁻¹	<0,001	0,500
Chumbo (Pb)	mg.L ⁻¹	<0,005	1,00
Cromo Total (Cr)	mg.L ⁻¹	<0,025	5,00
Fluoreto (F ⁻)	mg.L ⁻¹	1,39 ± 0,075	150,00
Mercúrio (Hg)	mg.L ⁻¹	<0,005	0,100
Prata (Ag)	mg.L ⁻¹	<0,005	5,00
Selênio (Se)	mg.L ⁻¹	<0,005	1,00
Extrato Solubilizado			
Alumínio (Al)	mg.L ⁻¹	0,313 ± 0,0054	0,2000
Arsênio (As)	mg.L ⁻¹	<0,005	0,010
Bário (Ba)	mg.L ⁻¹	0,245 ± 0,0039	0,700
Cádmio (Cd)	mg.L ⁻¹	<0,001	0,005
Chumbo (Pb)	mg.L ⁻¹	<0,005	0,010
Cianeto	mg.L ⁻¹	<0,005	0,070
Cloreto	mg.L ⁻¹	40,43 ± 0,97	250,00
Cobre (Cu)	mg.L ⁻¹	0,025 ± 0,0027	2,000
Cromo (Cr)	mg.L ⁻¹	<0,025	0,050
Ferro (Fe)	mg.L ⁻¹	0,527 ± 0,0058	0,300
Fluoreto (F ⁻)	mg.L ⁻¹	1,39 ± 0,075	1,500
Manganês (Mn)	mg.L ⁻¹	2,88 ± 0,0025	0,100
Mercúrio (Hg)	mg.L ⁻¹	<0,0001	0,001
Nitrato	mg.L ⁻¹	<1,00	10,00
Prata (Ag)	mg.L ⁻¹	<0,005	0,050
Selênio (Se)	mg.L ⁻¹	<0,005	0,010
Sódio (Na)	mg.L ⁻¹	2,99 ± 0,047	200,0
Sulfatos (SO ₄ ⁻)	mg.L ⁻¹	<10,0	250,0
Surfactantes	mg.L ⁻¹	<0,100	0,500
Zinco (Zn)	mg.L ⁻¹	<0,025	5,000
Fenóis Totais	mg.L ⁻¹	<0,00002	0,010

Como observado na tabela 13, os extratos lixiviados do lodo da ETA de São Gabriel apresentaram concentrações adequadas às indicadas no anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a), onde nenhum dos parâmetros ultrapassou os limites estipulados. Para o extrato solubilizado as concentrações de alumínio, ferro e manganês apresentaram concentrações que ultrapassaram os limites estipulados no anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Com base na NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004a), e conforme as características físico-químicas do lodo da ETA de São Gabriel, o resíduo é classificado como Classe II A –

Não perigoso e não inerte. Desde modo, o resíduo gerado na ETA deve ser destinado corretamente, causando os menores impactos possíveis ao meio ambiente. A disposição final para lodos de ETAs em sua maioria ocorre em aterros sanitários, mas outras alternativas podem ser realizadas como: aplicação em solos agrícolas; uso na fabricação de material cerâmico e na construção civil; recuperação do coagulante; disposição em ETEs; e incineração.

6.3 ETAPA III – ENSAIOS EM TESTE DE JARROS PARA AVALIAÇÃO DOS POLÍMEROS

Esta etapa do experimento consistiu em avaliar a eficiência de aplicação de cinco tipos de polímeros: Polímero Aniônico com média densidade da carga; Polímero Não-Iônico com muito alta densidade da carga; Polímero Catiônico com alta densidade da carga (Catiônico – A); Polímero Catiônico com baixa densidade da carga (Catiônico – B); e Polímero Catiônico com muito baixa densidade da carga (Catiônico – MB). A partir destes ensaios pôde-se definir qual tipo de polímero e dosagem apresentaram resultado mais satisfatório para a água clarificada do resíduo, com menor turbidez remanescente e melhor custo benefício. Sendo escolhidos dois tipos de polímeros para realizar os ensaios de adensamento por sedimentação, para cada uma das amostras de lodo coletado.

Os dados de turbidez da água clarificada de cada experimento em teste de jarros para o lodo coletado nas duas campanhas de amostragem são apresentados nas figuras 14 e 15, e na tabela 16.

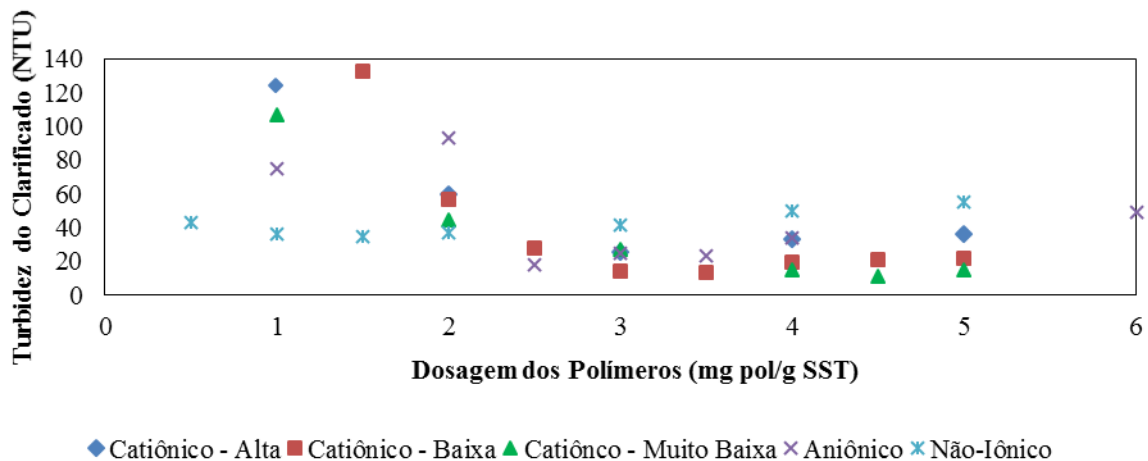
Posteriormente ao ensaio em teste de jarros, o lodo sem a utilização de polímero apresentou turbidez remanescente de 191 NTU para a primeira amostra, e 9.853 NTU para a segunda amostra (Tabela 16). Houve considerável diferença entre a turbidez remanescente do lodo da primeira e segunda coleta, o que possivelmente tenha ocorrido devido ao aumento da concentração de sólidos do lodo bruto entre as amostras, com teor de sólidos na ordem de 1,19% (primeira amostragem) e $2,23\% \pm 0,03\%$ (segunda amostragem). Outro fator que possa ter contribuído significativamente para o aumento da turbidez foi a troca de equipamento (turbidímetro) para realizar as leituras de turbidez remanescente nos ensaios com o lodo da primeira e segunda amostragem. Mas ressalta-se que para todas as análises de turbidez da mesma amostragem o aparelho manteve-se o mesmo.

Tabela 14 - Turbidez remanescente da água clarificada nos ensaios em Teste de Jarros, relacionada com as dosagens e tipo de polímeros utilizados, para as amostras coletas em agosto/2016 (Amostra 1) e novembro/2016 (Amostra 2).

Polímero	Dosagens (mg pol/ g SST)	Turbidez (NTU) Amostra 1	Turbidez (NTU) Amostra 2
Branco	0,0	191	9.853
Catiônico - Alta	1,0	124	-
	2,0	60	1.020
	2,5	-	703
	3,0	25,6	397,3
	3,5	-	439,3
	4,0	33,2	433
	5,0	36,7	-
	Catiônico - Baixa	1,5	133
2,0		57,1	-
2,5		27,8	677,7
3,0		14,7	266
3,5		13,3	76,3
4,0		19,4	78,7
4,5		21,1	78,2
5,0		22,1	-
Catiônico - MB	1,0	107	-
	2,0	44,6	-
	2,5	-	104
	3,0	27	97
	3,5	-	71,7
	4,0	15	50,3
	4,5	11,6	52,3
	5,0	14,8	63,7
Aniônico	0,5	-	80,5
	1,0	75,1	51,3
	1,5	-	38,3
	2,0	93,4	44,5
	2,5	18,3	56,3
	3,0	25,3	-
	3,5	23,5	-
	4,0	34,1	-
	6,0	49,4	-
Não-Iônico	0,5	43,1	69,7
	1,0	36	66,3
	1,5	34,6	62,3
	2,0	37	64
	2,5	-	63
	3,0	42	-
	4,0	50	-
5,0	55	-	

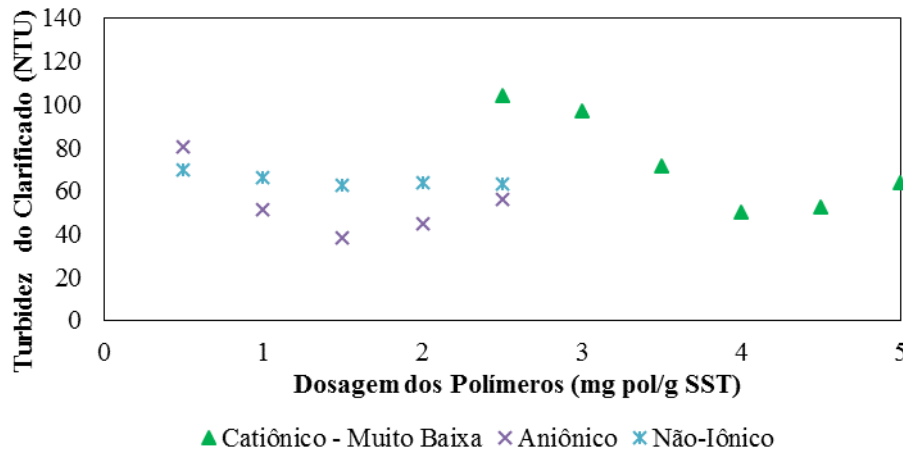
Para o lodo da primeira coleta, o polímero que resultou em água clarificada com menor turbidez foi o polímero catiônico com muito baixa densidade da carga (11,6 NTU com dosagem de 4,5 mg pol/g SST), como observa-se na figura 24. Contudo o polímero que apresentou melhor relação custo-benefício, com dosagem ótima para a remoção da turbidez, foi o polímero não-iônico com muito alta densidade da carga (34,6 NTU com dosagem de 1,5 mg pol/g SST).

Figura 24 - Tipo e dosagem de polímero relacionado com a turbidez remanescente da água clarificada, nos ensaios em teste de jarros para os polímeros Catiônicos, Aniônico e Não-Iônico, com dosagens que variaram de 0,5 a 6,0 mg pol/g SST, para o lodo da primeira coleta.



Para o lodo da segunda coleta a menor turbidez remanescente e melhor relação custo benefício (Figura 25), se deu ao polímero aniônico (38,3 NTU com dosagem de 1,5 mg pol/g SST). O polímero catiônico – MB apresentou a segunda menor turbidez remanescente na água clarificada (50,3 NTU), contudo a dosagem foi mais elevada, com 4,0 mg pol/g SST.

Figura 25 - Tipo e dosagem de polímero relacionado com a turbidez remanescente da água clarificada, nos ensaios em teste de jarros para os polímeros Catiônico - MB, Aniônico e Não-Iônico, com dosagens que variaram de 0,5 a 5,0 mg pol/g SST, para o lodo da segunda coleta.



Deste modo, com o intuito de reduzir a utilização dos diferentes tipos de polímeros optou-se por trabalhar nos ensaios de adensamento, com apenas dois tipos de polímeros por amostra de lodo coletada. O polímero catiônico com muito baixa densidade da carga foi utilizado em ambos os ensaios, e o polímero não-iônico, apenas no lodo da primeira coleta, e o aniônico apenas para o da segunda coleta.

Polímeros catiônicos normalmente apresentam resultados satisfatórios e são comumente utilizados no tratamento de lodos de ETAs, contudo polímeros não-iônicos e aniônicos também vêm apresentando resultados eficazes, o que aumenta sua utilização (AYOL, DENTEL e FILIBELI, 2005). De acordo como os mesmos autores, em estudo realizado, os polímeros catiônicos e não-iônicos foram selecionados devido aos bons resultados apresentados por outros autores, sendo em seu trabalho a melhor remoção de turbidez deu-se se a partir da utilização de polímero catiônico, sozinho ou em combinação com o polímero não-iônico.

6.4 ETAPA IV - ENSAIOS DE ADENSAMENTO DO LODO

Todos os ensaios de adensamento do lodo, tanto por sedimentação quanto por FAD, foram realizados em escala de bancada, com alimentação em batelada. Visando a melhor compreensão dos resultados, os ensaios foram divididos entre as campanhas de amostragem, ensaios preliminares de adensamento (primeira amostragem) e ensaios experimentais de adensamento (segunda amostragem).

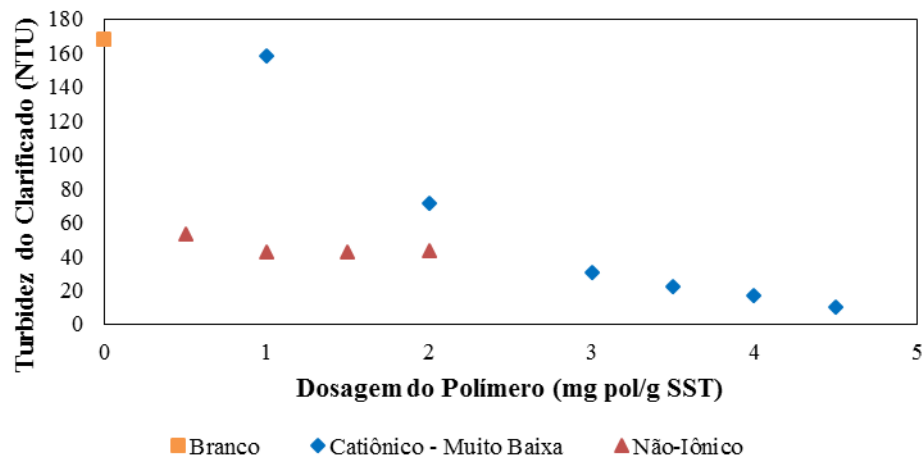
6.4.1 Ensaios preliminares de adensamento como o lodo da ETA de São Gabriel, RS

Os ensaios preliminares de adensamento foram realizados com o lodo dos decantadores, da primeira coleta (em agosto de 2015), e tiveram por principal objetivo investigar a viabilidade do processo de adensamento, por sedimentação e por FAD, perante as distintas dosagens dos polímeros selecionados. O lodo bruto desta fase do estudo apresentou teor de sólidos de 1,19%.

6.4.1.1 Adensamento por Sedimentação com lodo da primeira coleta

Os resultados referentes à turbidez da água clarificada resultantes do adensamento por sedimentação podem ser observados na figura 26 e no apêndice A. Observa-se que para todos os tratamentos que utilizaram polímeros houve redução da turbidez da água clarificada, em comparação com o tratamento que não utilizou nenhuma dosagem de polímero (branco), apresentado turbidez remanescente de 168 NTU.

Figura 26 - Turbidez do clarificado relacionada à dosagem dos polímeros catiônico – MB e não-iônico, nos ensaios preliminares de adensamento sedimentação.



Pode-se observar que para os ensaios com polímero catiônico – MB, com o aumento da dosagem do polímero à uma diminuição da turbidez remanescente, com melhor eficiência para a dosagem de 4,5 mg pol/g SST, resultando em turbidez de 10,4 NTU.

Nos ensaios com o polímero não-iônico as dosagens que apresentaram melhor resultado para a remoção da turbidez foram de 1 e 1,5 mg pol/g SST, com 42,8 NTU e 42,5 NTU, respectivamente. Com o aumento da dosagem do polímero para 2 mg pol/g SST houve um aumento da turbidez (43 NTU), demonstrando que o aumento da dosagem resultou em um aumento da turbidez remanescente do clarificado.

As análises da série de sólidos (ST, STF, STV, SST, SSF e SSV) no lodo adensado por sedimentação são exibidas na tabela 15 e Apêndice G. As porcentagens de ST e SST foram parecidas, o que era esperado, pois em lodos de ETA a maior parcela dos sólidos se deve a sólidos em suspensão. Entre as análises a porcentagem de STV e STF em relação aos ST apresentaram valores constantes, com desvio padrão de 1,31.

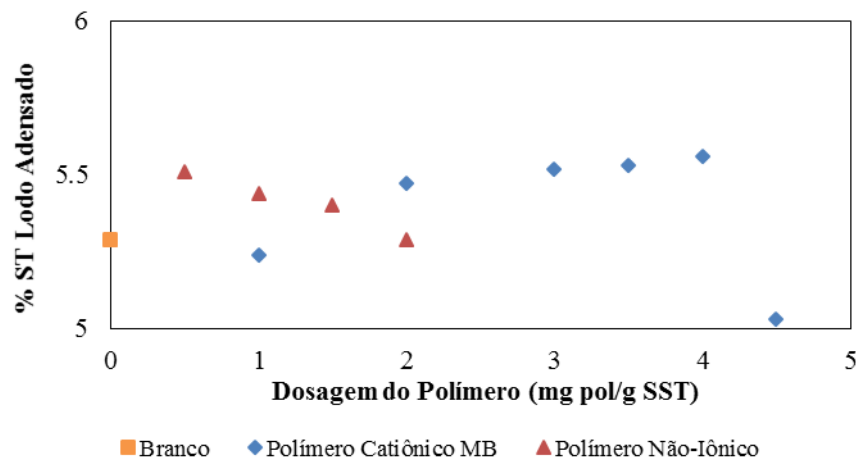
Tabela 15 - Teor de sólidos totais no lodo adensado por sedimentação para diferentes dosagens de polímero catiônico – MB e não-iônico, e porcentagem ST em relação a STV e STF.

Tipo de Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	ST (%)	STV (%ST)	STF (%ST)
Branco	0	5,29	24,89	75,11
	1	5,24	24,05	75,95
Catiônico MB	2	5,47	23,72	76,28
	3	5,52	22,83	77,17
	3,5	5,53	22,07	77,93
	4	5,56	23,19	76,81
	4,5	5,03	22,18	77,82
	0,5	5,51	19,78	80,22
Não-Iônico	1	5,44	19,68	80,32
	1,5	5,4	24,92	75,08
	2	5,29	22,72	77,28
	Média	-	22,73	77,27
	Desvio padrão	-	1,31	1,31

Nos ensaios de adensamento por sedimentação a concentração de ST no lodo adensado com o polímero catiônico – MB foi superior ao polímero não-iônico, com exceção para as dosagens de 1 e 4,5 mg pol/g SST (Tabela 15). Como pode ser observado na figura 27, os ST apresentaram valores na ordem de 5,03 a 5,56%, sendo a maior concentração de sólidos para o lodo adensado com polímero catiônico – MB em uma dosagem de 4,0 mg pol/g SST. O lodo adensado sem qualquer utilização de polímero (branco) apresentou uma concentração superior de sólidos (5,29%) as resultantes do processo de adensamento com

dosagens de 1 e 4,5 mg pol/g SST do polímero catiônico – MB (5,24 e 5,03%) e para a dosagem de 2 mg pol/g SST do polímero não-iônico (5,29%).

Figura 27 - Teor de sólidos totais no lodo adensado relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e não-iônico, nos ensaios preliminares de adensamento sedimentação.

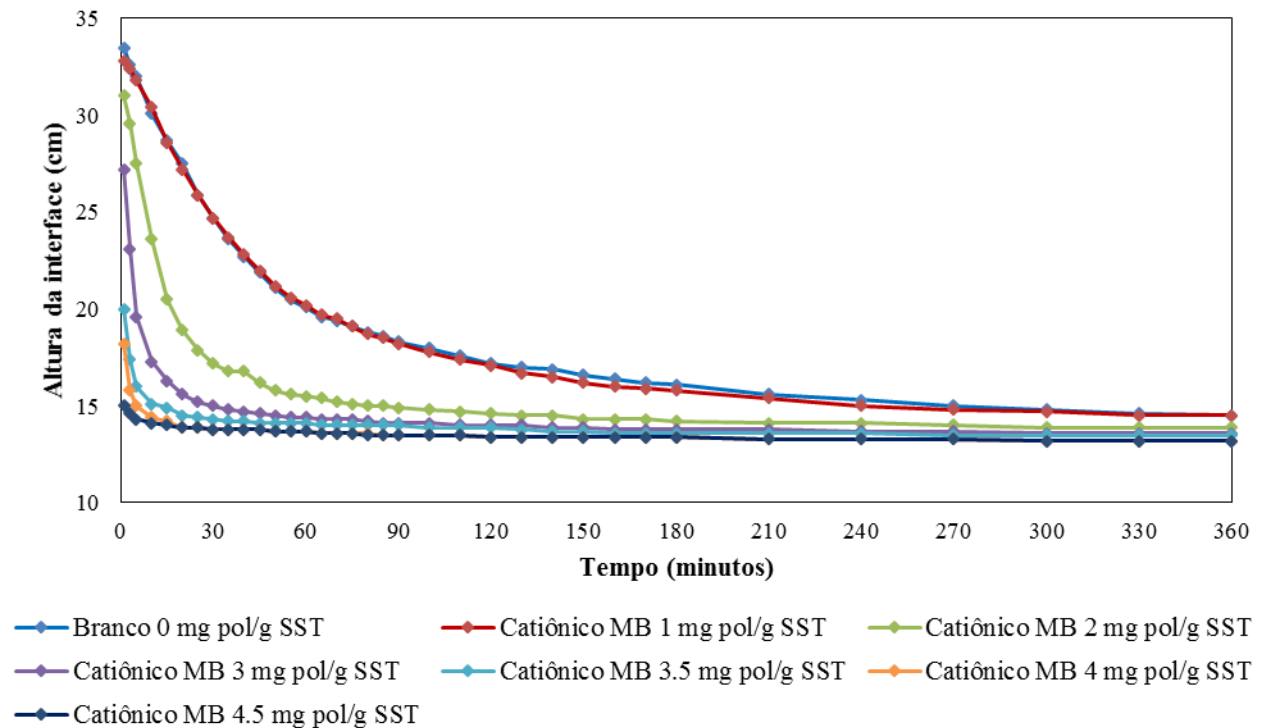


As curvas da interface de clarificação/adensamento dos ensaios realizados em coluna de sedimentação com os polímeros catiônico – MB e não-iônico são observadas nas figuras 28 e 29. Para ambos os ensaios realizados, nos experimentos sem polímeros (branco), as curvas de adensamento obtiveram comportamento semelhante, comprovando a repetitividade dos ensaios.

Para os ensaios realizados com o polímero catiônico – MB, pode-se observar que para as dosagens de 0 e 1 mg pol/g SST praticamente não houve diferença no processo de sedimentação (Figura 28), com formação de curvas praticamente idênticas, contudo a turbidez remanescente da água clarificada nesses ensaios não apresentou tal comportamento (Figura 26), demonstrando que a utilização de polímero contribuiu para a diminuição da turbidez da água clarificada.

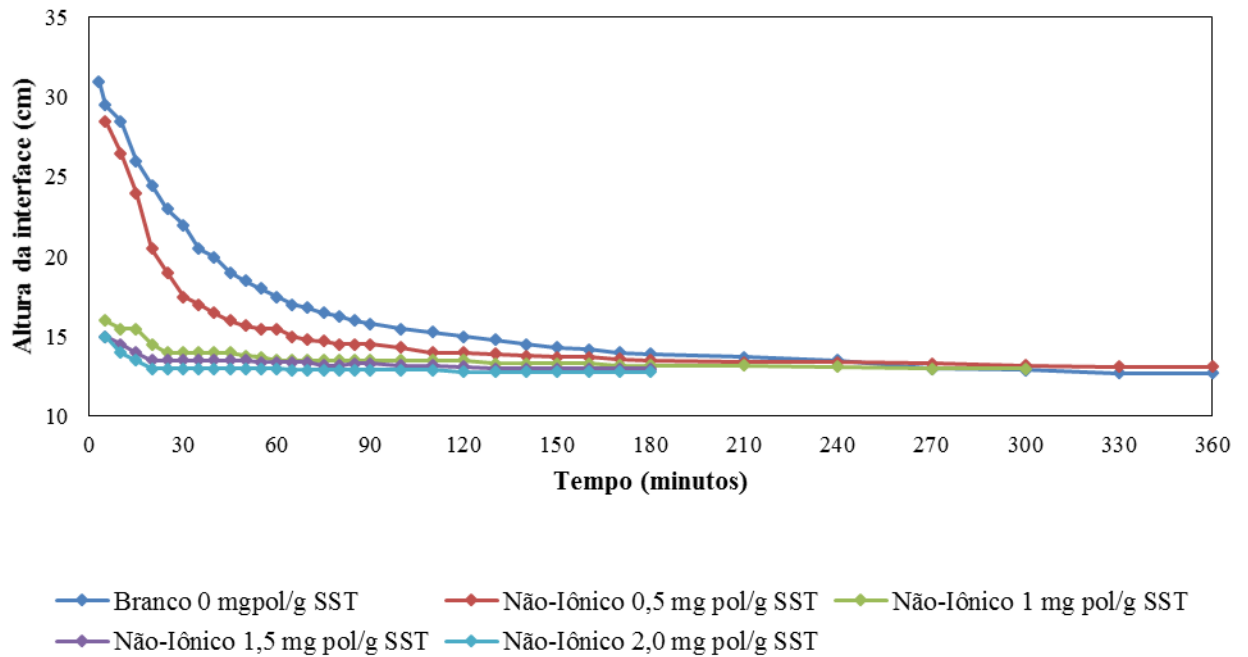
As curvas do adensamento resultante das dosagens de 2 e 3 mg pol/g SST apresentaram comportamento intermediário no início do processo de sedimentação, mas permaneceram constantes a partir dos 180 minutos de ensaio. Para as dosagens de 3,5 e 4 mg pol/g SST as curvas apresentaram comportamento semelhante a curva resultante da dosagem de 4,5 mg pol/g SST, contudo a última manteve praticamente constante ao longo de tempo de sedimentação, já a partir dos 30 minutos de ensaio (Figura 28).

Figura 28 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de Polímero Catiônico MB, para as dosagens de 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 3,5; 4,0; e 4,5 mg pol/g SST.



Nos ensaios realizados com o polímero não-iônico observa-se que as dosagens de 0,0 e 0,5 mg pol/g SST não apresentaram grandes diferenças entre as curvas de adensamento, apenas no período intermediário do ensaio, entre os 15 e 60 minutos. Para as dosagens de 1,0; 1,5 e 2,0 mg pol/g SST as curvas de adensamento apresentaram comportamento similar, contudo a maior dosagem de polímero resultou em curva de adensamento com menor variação ao longo do tempo de ensaio, demonstrando a maior velocidade de clarificação com o aumento da dosagem de polímero (Figura 29).

Figura 29 - Curvas da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de Polímero Não-Iônico, para as dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; e 2,0 mg pol/g SST.

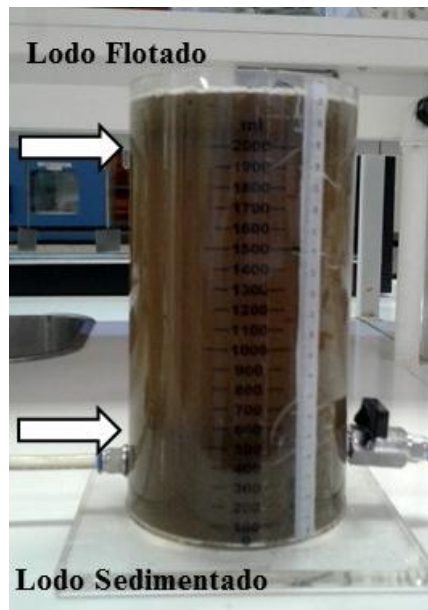


6.4.1.2 Adensamento por flotação a ar dissolvido (FAD) com lodo da primeira coleta

Para avaliar o desempenho do adensamento por FAD sem a utilização de polímeros foram realizados ensaios com taxa de reciclo de 30, 50 e 100% com pressão de saturação de 6 atm. Ambos os ensaios resultaram em pequena camada de material flotado com sedimentação para a maioria dos flocos, como pode ser observado na figura 30, com indicação para as camadas de lodo sedimentado e flotado.

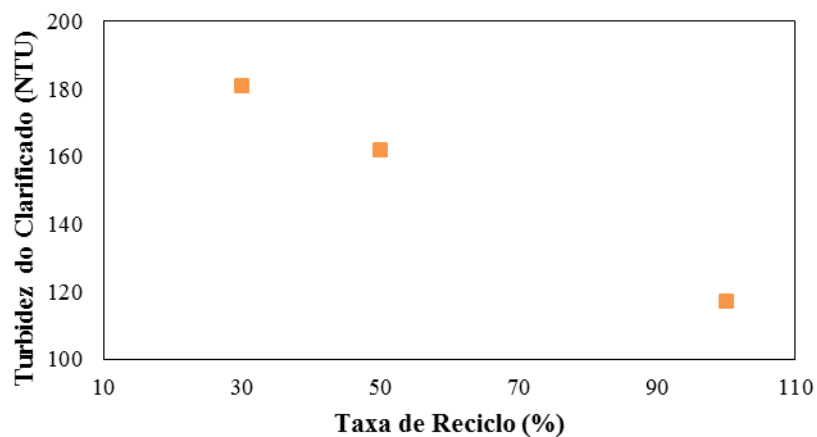
Como indicado na figura 31 (e tabela do Apêndice A), observa-se que com o aumento da taxa de reciclo há uma diminuição da turbidez remanescente da água clarificada (181 NTU Tr de 30%; 162 NTU Tr de 50%; 117 NTU Tr de 100%). A diminuição da turbidez no adensamento por FAD sem a utilização de polímeros ocorre devido ao maior volume de ar e água adicionado ao lodo durante o processo de flotação.

Figura 30 - Adensamento por flotação sem a utilização de polímero, com taxa de reciclo de 100%, com indicação para as camadas de lodo sedimentado e flotado.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Turbidez do clarificado relacionado com as taxas de reciclo (30, 50 e 100%) nos ensaios preliminares de adensamento por flotação.



No processo de adensamento por FAD do lodo, além dos dois tipos de polímeros selecionados para a sedimentação também foram testadas diferentes doses dos outros tipos de polímeros. Porém o único que apresentou resultado satisfatório para a flotação do material floculado, foi o polímero catiônico com muito baixa densidade da carga.

As dificuldades nos ensaios de adensamento do lodo por FAD foram evidenciadas nos ensaios sem a utilização de polímero e com o polímero catiônico com alta densidade da carga; polímero catiônico com baixa densidade da carga; polímero aniônico com média densidade da carga; e polímero não-iônico com muito alta densidade da carga.

A flotação incompleta do lodo com a utilização dos demais polímeros possivelmente ocorreu por eles apresentarem maior viscosidade. O acréscimo da viscosidade do meio líquido aumenta as forças de resistência ao arraste (ZAHO, 2004a), dificultando o processo de flotação e conseqüentemente tendência dos flocos à sedimentação, contudo baixas dosagens de polímeros podem não formar flocos suficientemente grandes para promover o arraste do material a superfície. Por meio do resultado da tabela 16, pode-se perceber que o polímero com menor viscosidade (0,07) foi o catiônico – MB, sendo o polímero aniônico o mais viscoso (2,43) entre os cinco polímeros.

Tabela 16 - Densidade e viscosidade dos polímeros Catiônicos, Aniônico e Não-Iniônico.

Tipo Iônico	Densidade da carga	Viscosidade g/cm.s (20°C)
Aniônico	Média	2,43
Não iônico	Muito elevada	0,08
Catiônico	Alta	0,83
Catiônico	Baixa	0,35
Catiônico	Muito Baixa	0,07

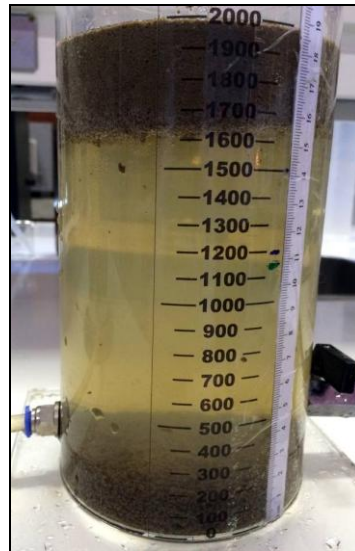
Também deve-se considerar, que para o processo da FAD ser eficiente, além do uso do coagulante/floculante correto, é necessário garantir as condições ideais de floculação e de dosagem do produto químico utilizado (EDZWALD e WINGLER, 1990). Para que os flocos formados apresentem características, como tamanho, densidade e carga, que proporcionem uma melhor agregação entre as microbolhas.

Para garantir as condições ideais da FAD, faz-se necessário que a floculação também seja eficiente. A eficácia do processo de floculação depende de vários fatores entre eles estão a escolha do tipo de floculante, a dosagem, a força iônica, quantidade de sólidos dissolvidos, tamanho dos sólidos e distribuição das partículas (SHER, MALIK e LIU, 2013).

Nos ensaios de adensamento por FAD apenas o polímero catiônico – MB apresentou flotação completa do lodo. A utilização dos demais polímeros estudados, em diferentes dosagens, inviabilizaram o processo de flotação, não sendo possível realizar a flotação

completas dos flocos, mesmo com uma taxa de reciclo de 100%. Na figura 32 apresenta-se um ensaio de adensamento por FAD, com polímero não-iônico (P_{sat} de 6 atm e Tr de 100%), em que praticamente a metade do resíduo ficou armazenada no fundo da coluna de flotação.

Figura 32 - Ensaio de adensamento por flotação utilizando Polímero Não-Iônico, com sedimentação de flocos no fundo da célula de flotação.



Fonte: Autor.

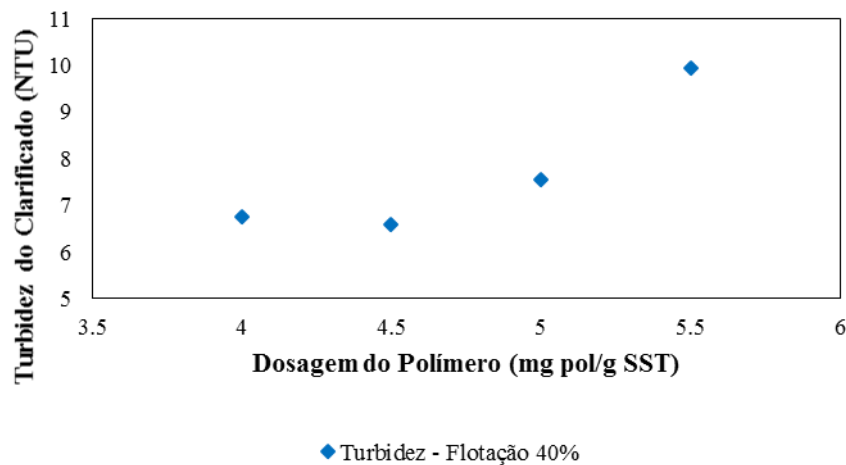
Nos ensaios de adensamento por FAD com o polímero catiônico – MB, também houve a sedimentação de flocos no fundo do jarro para algumas dosagens do polímero. A taxa de reciclo utilizada foi de 40% e pressão de saturação de 6 atm, sendo 4,5 e 5 mg pol/g SST as dosagens que resultaram em flotação completa do lodo. Para as demais dosagens foi verificado a formação de material sedimentado no fundo do jarro após o adensamento por FAD.

A não ocorrência da flotação do lodo com uma dosagem de 4,0mg pol/g SST pode ter ocorrido devido ao pequeno tamanho dos flocos ou/e pela necessidade de uma maior taxa de reciclo para o arraste dos flocos. Utilizando a dosagem de 5,5 mg pol/g SST os flocos formados apresentaram elevada densidade e viscosidade, devido à maior quantidade de polímero e tenderam a sedimentar no fundo do jarro, também necessitando maior taxa de recirculação.

Os valores de turbidez remanescente da água clarificada resultante dos ensaios preliminares de adensamento por FAD como o polímero catiônico – MB, são observados na

figura 33 e no Apêndice A. O parâmetro foi analisado para todos os ensaios realizados, mesmo os que não apresentaram resultado satisfatório para a flotação do lodo. A menor turbidez remanescente deu-se pelo tratamento com dosagem de 4,5 mg pol/g SST (6,6 NTU).

Figura 33- Turbidez remanescente do clarificado relacionado com as dosagens do polímero Catiônico – MB, nos ensaios preliminares de adensamento por FAD, Tr de 40% e P_{sat} de 6 atm.



As análises da série de sólidos (ST, STF, STV, SST, SSF e SSV) no lodo adensado por FAD são apresentadas na tabela 17 e Apêndice G. Assim como nos ensaios por sedimentação os valores correspondentes a ST apresentaram valores próximos a SST, e a porcentagem de ST em relação a STF e STV manteve-se constante entre os tratamentos, com desvio padrão de 0,47.

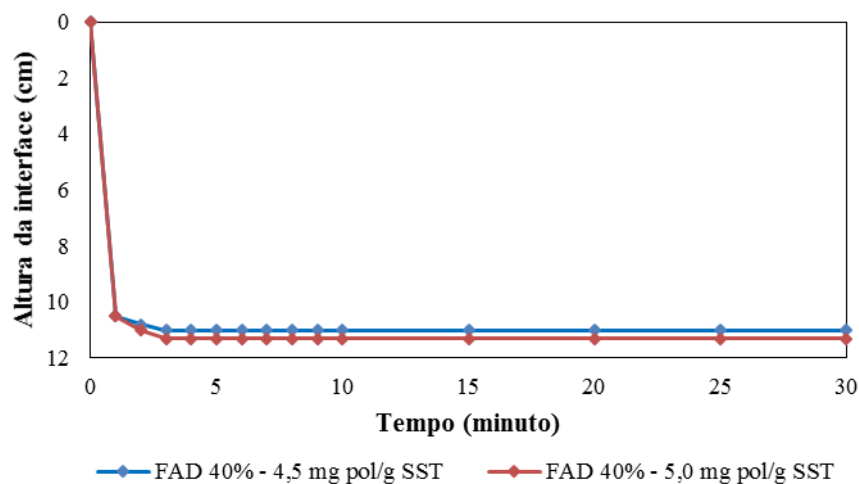
Nos ensaios de adensamento por flotação os ST apresentaram valores na ordem de 3,72 a 5,25% (Tabela 17 e Apêndice B), sendo a maior concentração de sólidos no lodo adensado foi com uma dosagem de 5 mg pol/g SST do polímero catiônico – MB, e a menor concentração para o tratamento sem a utilização de polímero e com taxa de reciclo de 30%.

Tabela 17 - Teor de sólidos no lodo adensado por FAD (Psat de 6 atm) para diferentes dosagem de polímero Catiônico – MB, e porcentagem de ST em relação a STV e STF.

Dosagem (mg pol/g SST)	Taxa de reciclo (%)	ST (%)	STV (%ST)	STF (%ST)
0,0	30	3,72	21,55	78,45
0,0	50	3,81	21,43	78,57
0,0	100	4,09	22,49	77,51
4,0	40	4,93	21,15	78,85
4,5	40	4,93	21,53	78,47
5,0	40	5,25	22,35	77,65
5,5	40	3,89	22,26	77,74
Média		-	2,82	78,18
Desvio Padrão		-	0,47	0,47

As curvas de clarificação/ascensão para a taxa de reciclo de 40%, com dosagens de 4,5 e 5 mg pol/g SST são apresentadas na figura 34, evidenciando que o processo de flotação apresentou estabilidade na velocidade de clarificação antes dos 5 minutos de ensaio, para ambas as dosagens.

Figura 34 - Curvas da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico - MB, para as dosagens de 4,5 e 5,0 mg pol/g SST.



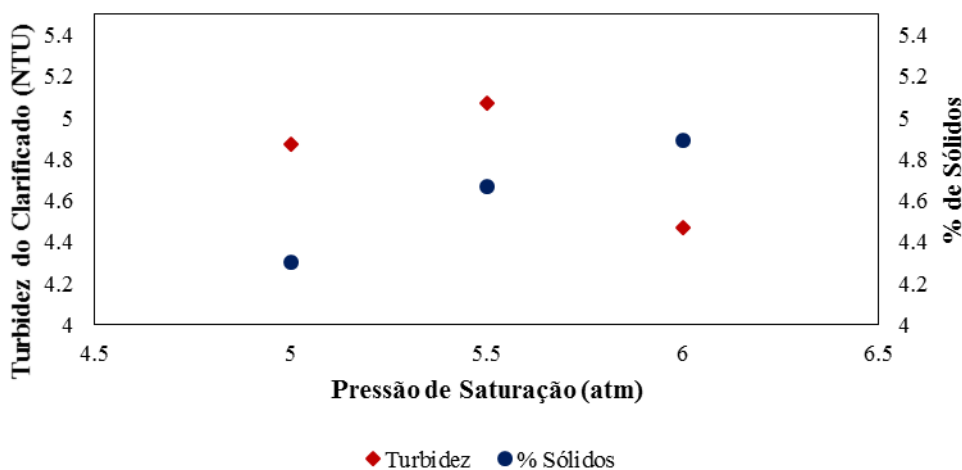
6.4.1.2.1 Condições operacionais da FAD - Pressão de Saturação

Com base nos ensaios de adensamento por FAD, pode-se observar que a dosagem de 4,5 mg pol/g SST do polímero Catiônico – MB foi a que resultou em menor turbidez remanescente, sendo este o critério adotado para a realização dos ensaios com diferentes pressões de saturação.

Deste modo, para os ensaios que variaram a pressão de saturação a dosagem do polímero (catiônico - MB) e a taxa de reciclo mantiveram-se fixadas em 4,5 mg pol/g SST e 40%, sendo variada as pressões em 5,0; 5,5; e 6,0 atm. O ensaio que apresentou resultado satisfatória o adensamento do lodo por FAD, foi com pressão de 6 atm, pois ao término do ensaio não se verificou a formação de material sedimentado, diferente do que ocorreu para as pressões de 5,0 e 5,5 atm.

Com o aumento da pressão de saturação, além da melhor flotação do lodo floculado, ocorreu diminuição da turbidez remanescente da água clarificada e aumento da concentração de sólidos no lodo adensado, como pode ser observado na figura 35 (Apêndice B), com turbidez de 4,47 NTU e concentração de sólidos de 4,89% para o tratamento com 4,5 mg pol/g SST, Tr de 40% e Psat de 6 atm. Em estudo realizado por Han, Kim e Kim (2007) também houve aumento na eficiência da remoção da turbidez, da água sintética utilizada no estudo, com o aumento da pressão de saturação.

Figura 35 - Turbidez remanescente do clarificado e teor de sólidos no lodo adensado por FAD, com dosagem de polímero de 4,5 mg pol/g SST, taxa de reciclo de 40% e pressões de saturação de 5,0; 5,5; e 6,0 atm.



6.4.1.3 Síntese dos resultados do adensamento do lodo da primeira coleta

No decorrer dos ensaios de adensamento, tanto por sedimentação como por FAD, pode-se observar que a concentração de sólidos no lodo adensado e a turbidez remanescente da água clarificada, resultante do processo, foram afetadas positivamente pela utilização dos polímeros. O uso de polímeros no adensamento é necessário para aumentar a concentração de sólidos no lodo (requerida no processo de desaguamento) e para facilitar a saída de água do lodo (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2011).

A eficiência do tratamento na diminuição da turbidez remanescente foi de 94,8%, em para o tratamento sem a utilização de polímero (168 NTU) e o melhor resultado para o adensamento por sedimentação, resultando em 10,4 NTU (dosagem de 4,5 mg pol/g SST de polímero catiônico – MB).

Para o adensamento por FAD a eficiência do tratamento para a remoção da turbidez foi de 94,3% em relação a taxa de reciclo de 100% (sem polímero) e o melhor resultado do tratamento com polímero catiônico – MB (dosagem de 4,5 mg pol/g SST, taxa de reciclo de 40% e pressão de saturação de 6 atm).

Para a melhor condição da sedimentação em relação a concentração de sólidos (4,0 mg pol/g SST de polímero catiônico - MB), a eficiência do adensamento do lodo foi de apenas 5,1%, em relação ao branco. Já para a FAD a melhor eficiência na concentração de sólidos foi de 28%, em relação a taxa de reciclo de 100% (sem polímero) e o melhor resultado do tratamento do tratamento com polímero catiônico – MB (dosagem de 5 mg pol/g SST, taxa de reciclo de 40% e pressão de saturação de 6 atm).

Os resultados preliminares de adensamento do lodo da ETA de São Gabriel possibilitaram importantes observações durante a realização dos ensaios, como: procedimentos metodológicos; comportamento do lodo floculado frente ao adensamento por sedimentação e flotação; e dosagens de polímeros que apresentaram melhor resultado para a água clarifica (com menor turbidez), e maior concentração de sólidos no adensamento do lodo.

Ainda deve-se considerar que a partir dos ensaios preliminares de adensamento por FAD pode-se determinar qual o polímero apresentou resultado efetivo para a completa flotação do material floculado (catiônico – MB), sendo este adotado nos ensaios experimentais de adensamento por FAD. Também pode-se determinar qual a pressão de saturação com melhor resultado no adensamento e flotação completa do lodo, sendo está igualmente selecionada para a realização dos posteriores ensaios.

6.4.2 Ensaios experimentais adensamento com o lodo da ETA de São Gabriel, RS

Esta fase do experimento foi realizada com lodo proveniente dos decantadores da ETA preparado com água de diluição correspondente a utilizada na limpeza dos decantadores. O lodo utilizado nos ensaios de adensamento apresentou concentração de sólidos de 22.325 mg.L⁻¹ ($\pm 0,300$ mg.L⁻¹). Os ensaios desta etapa foram baseados nos ensaios preliminares de adensamento, onde pode-se acompanhar o comportamento do lodo flocculando durante o adensamento por sedimentação e por FAD.

A partir dos valores obtidos nos ensaios em teste de jarros, para o lodo da segunda coleta, pode-se definir o tipo de polímero empregado nos ensaios de adensamento por sedimentação.

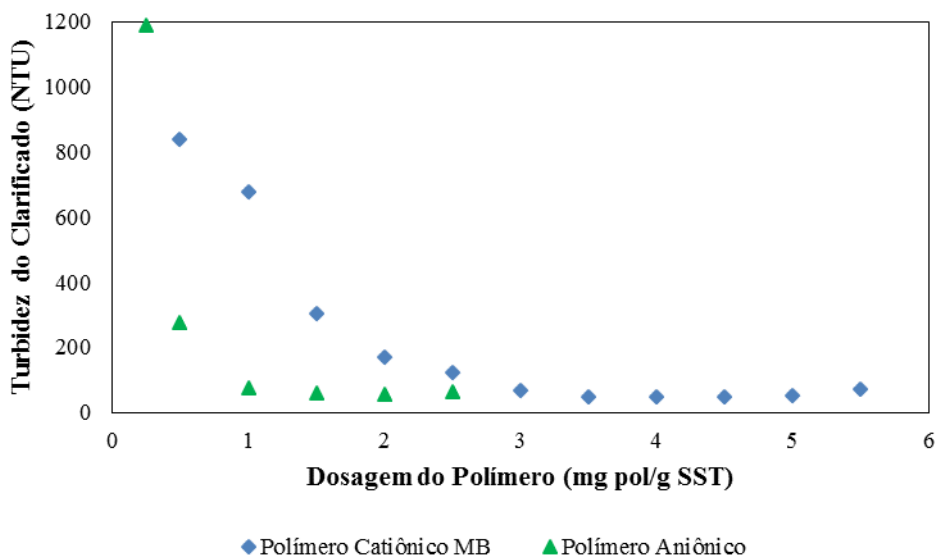
6.4.2.1 Ensaios de Adensamento por Sedimentação com lodo da segunda coleta

Os resultados referentes a turbidez da água clarificada resultantes do adensamento por sedimentação podem ser observados na figura 34 e no Apêndice C. Para todos os tratamentos que utilizaram polímeros, houve redução da turbidez, em comparação com o tratamento que não utilizou nenhuma dosagem de polímero (branco), o qual apresentou turbidez remanescente do sobrenadante de 8.593,2 NTU, após o ensaio de adensamento por sedimentação.

Como observado na figura 36, a turbidez remanescente para as dosagens do polímero catiônico – MB entre 0,5 a 2,5 mg pol/g SST apresentou-se superior aos ensaios com polímero aniônico, com exceção da dosagem de 0,25 mg pol/g SST. Para os ensaios com ambos os polímeros o comportamento frente ao aumento da dosagem foi o mesmo, onde houve uma diminuição da turbidez até determinada dosagem, sendo o aumento da mesma resultante em acréscimo da turbidez remanescente.

Demonstrando que o excesso de polímero resulta em um aumento da turbidez do clarificado, fato que também ocorreu nos demais ensaios. Em estudos realizados por Oyegbile e Narraa (2016) também ocorreu um aumento da turbidez do clarificado com o excesso da dosagem de polímero, o que pode ser atribuído ao aumento da adsorção ótima do polímero, que resulta em menor agregação das partículas.

Figura 36 - Turbidez do clarificado relacionado com a dosagem dos polímeros catiônico – MB (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5) e aniônico (0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5), nos ensaios experimentais de adensamento por sedimentação.



A realização dos ensaios com o polímero catiônico – MB apresentou menor turbidez para a dosagem de 4,5 mg pol/g SST com 46,3 NTU, sendo a dosagem de 5,5 mg pol/g SST resultante em 71,7 NTU. A dosagem com melhor eficiência para o polímero catiônico – MB, desta fase do experimento, foi a mesma que no adensamento preliminar do por sedimentação.

Nos ensaios com o polímero aniônico as dosagens que apresentaram melhor resultado para a remoção da turbidez foram de 1,5 e 2,0 mg pol/g SST, com 58 NTU e 54,4 NTU, respectivamente. Com o aumento da dosagem do polímero para 2,5 mg pol/g SST houve um aumento da turbidez para 62 NTU.

As análises referentes a série de sólidos (ST, STF, STV, SST, SSF e SSV) no lodo adensado por sedimentação são apresentadas na tabela 18 e Apêndice G, assim como nos ensaios preliminares os resultados mantiveram-se aproximados. Tanto a porcentagem de STV e STF em relação aos sólidos totais com desvio padrão de 0,36 para STV e STF.

Tabela 18 - Teor de sólidos no lodo adensado por sedimentação para diferentes dosagens de polímero catiônico – MB e aniônico, e porcentagem ST em relação a STV e STF.

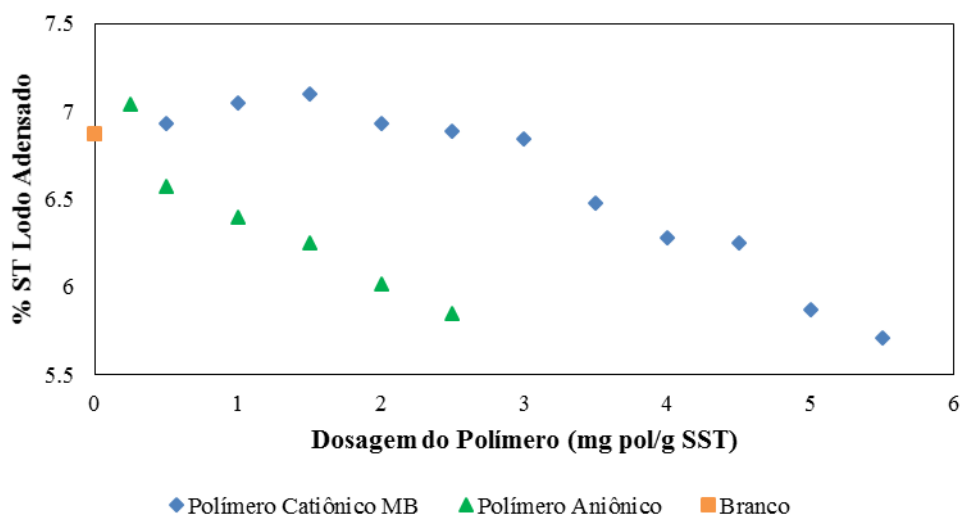
Tipo de Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	ST (%)	STV (%ST)	STF (%ST)	
Branco	0	6,88	22,48	77,52	
	0,5	6,93	23,66	76,34	
	1,0	7,05	23,28	76,72	
	1,5	7,10	23,68	76,32	
	2,0	6,93	23,42	76,58	
	2,5	6,89	23,15	76,85	
	Catiônico MB	3,0	6,84	23,40	76,60
		3,5	6,48	23,18	76,82
		4,0	6,28	23,33	76,67
		4,5	6,25	23,68	76,32
		5,0	5,87	23,56	76,44
		5,5	5,71	23,08	76,92
	Aniônico	0,25	7,04	23,22	76,78
0,50		6,57	22,26	77,74	
1,0		6,40	22,14	77,86	
1,5		6,25	22,81	77,19	
2,0		6,02	22,91	77,09	
2,5		5,85	22,89	77,11	
Média		-	23,12	76,88	
Desvio padrão		-	0,36	0,36	

Nos ensaios de adensamento por sedimentação a concentração de ST no lodo adensado sem a utilização do polímero foi de 6,88%, apresentando valores inferiores para as dosagens de 0,25 mg pol/g SST para o polímero aniônico e 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5 25 mg pol/g SST para o polímero catiônico – MB (figura 35). Dentre os tratamentos realizados, a maior concentração de sólidos para o lodo adensado foi de 7,10%, para a dosagem de 1,5 mg pol/g SST do polímero catiônico – MB, a partir desta dosagem com o aumento do polímero a concentração de sólidos decai proporcionalmente.

Como observado na figura 37, a dosagem de polímero aniônico que resultou em maior concentração de sólidos foi a de 0,25 mg pol/g SST (7,04%), a partir desta houve diminuição do teor de sólidos com o aumento da dosagem de polímero. Entre os tratamentos realizados o menor teor de sólidos foi de 5,85% (2,5 mg pol. aniônico/g SST) e 5,71% (5,5 mg pol. catiônico/g SST).

A utilização de polímeros influencia diretamente o processo de sedimentação, pois através da ação dos polímeros ocorre a formação de flocos que aumentam a velocidade de sedimentação. Em estudos realizados por Zhao (2004b) houve um aumento inicial do tamanho do floco com a adição de baixas dosagens de polímeros, à medida em que ocorreu saturação da dose de polímero apesar do aumento contínuo do tamanho do floco, ocorre uma diminuição da eficiência do processo de sedimentação. Pois a viscosidade elevada do meio impede que a sedimentação (compactação) aumente constantemente, deste modo a maior dosagem de polímero não significa necessariamente maior concentração de sólidos.

Figura 37 - Teor de sólidos totais no lodo adensado relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e aniônico.



As curvas provenientes dos ensaios de adensamento por sedimentação para o polímero catiônico – MB e aniônico são apresentadas nas figuras 38 e 39, as curvas médias de cada ensaio estão presentes no Apêndice D. Pode-se observar que com o aumento das dosagens dos polímeros, tanto catiônico – MB quanto aniônico, houve uma diminuição da compactação do lodo floculado (sólidos), o que explica a diminuição do teor de sólidos no lodo adensado com o aumento da dosagem de polímero.

Figura 38 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico - MB, para as dosagens de 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST.

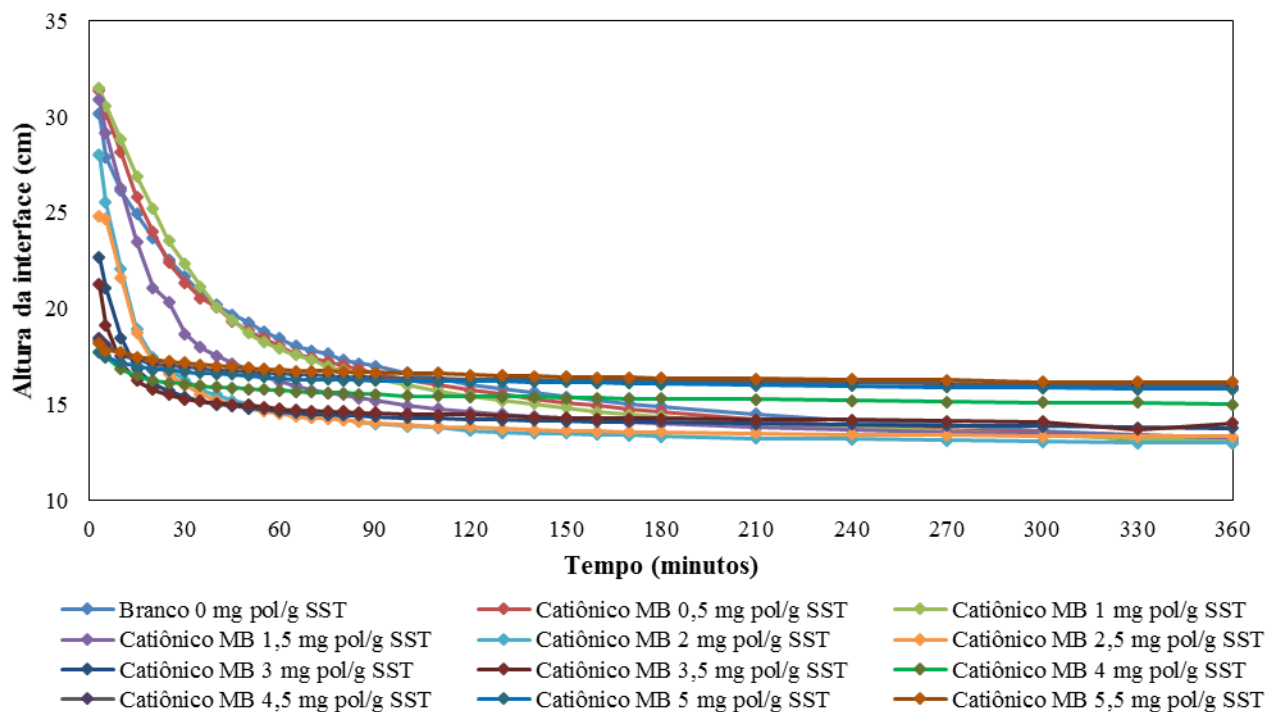
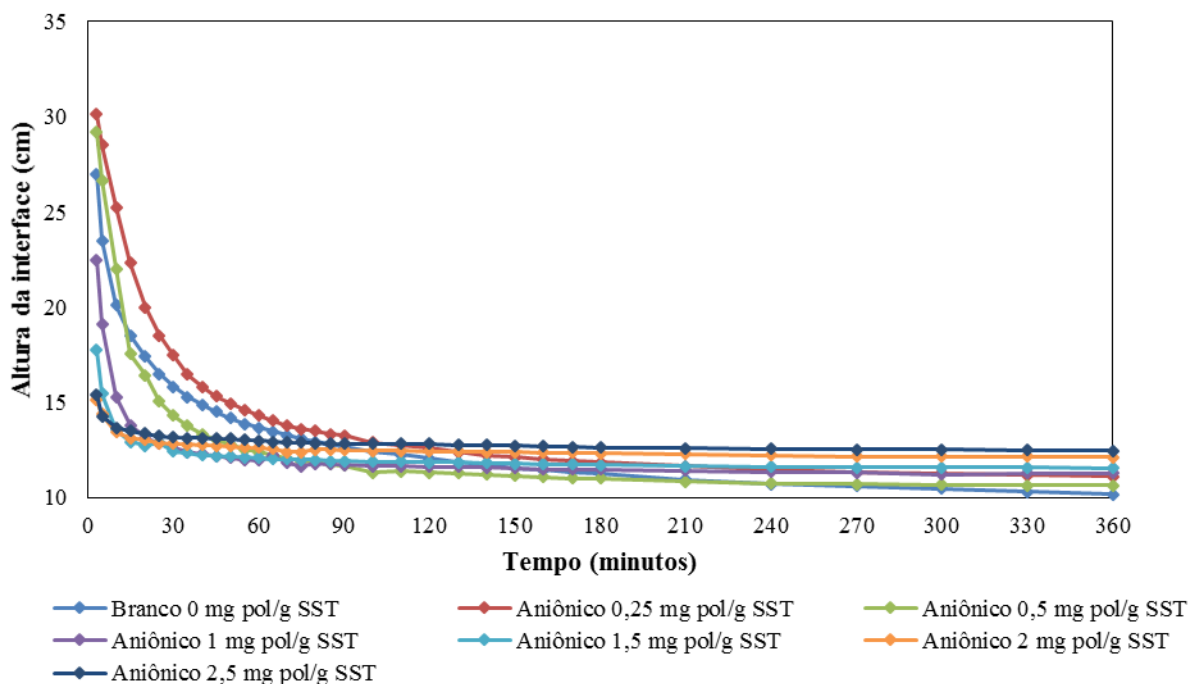


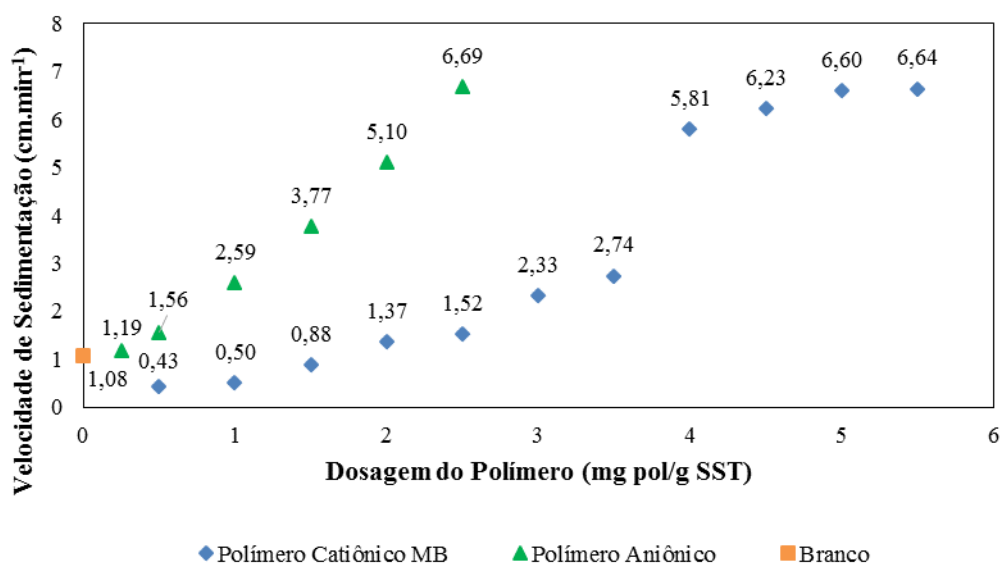
Figura 39 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero aniônico, para as dosagens de 0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5 mg pol/g SST.



Na figura 40 no apêndice E são apresentadas as velocidades de clarificação (Vcl) dos lodos adensados por sedimentação para os tratamentos com e sem a adição de polímero. Para ambos os tratamentos, quanto mais elevada a dosagem de polímeros maior é a velocidade de clarificação, pois mais rápido o lodo sedimenta. As velocidades máximas de clarificação ocorreram nos minutos iniciais do adensamento por sedimentação, sendo as maiores velocidades de clarificação de 6,69 cm.min⁻¹, para o tratamento com 2,5 mg pol. aniônico/g SST, e de 6,64 cm.min⁻¹, para o tratamento com 5,5 mg pol. catiônico - MB/g SST.

O tratamento sem a adição de polímero (branco) obteve maior velocidade de sedimentação, 1,08 cm.min⁻¹, em comparação os tratamentos com dosagens de 0,5; 1,0; e 1,5 mg pol. catiônico - MB/g SST (0,43; 0,5; e 0,88 cm.min⁻¹), o que se deve a resistência a sedimentação promovida pelo polímero.

Figura 40 - Velocidade de clarificação do adensamento por sedimentação para os tratamentos com polímero catiônico – MB e aniônico.

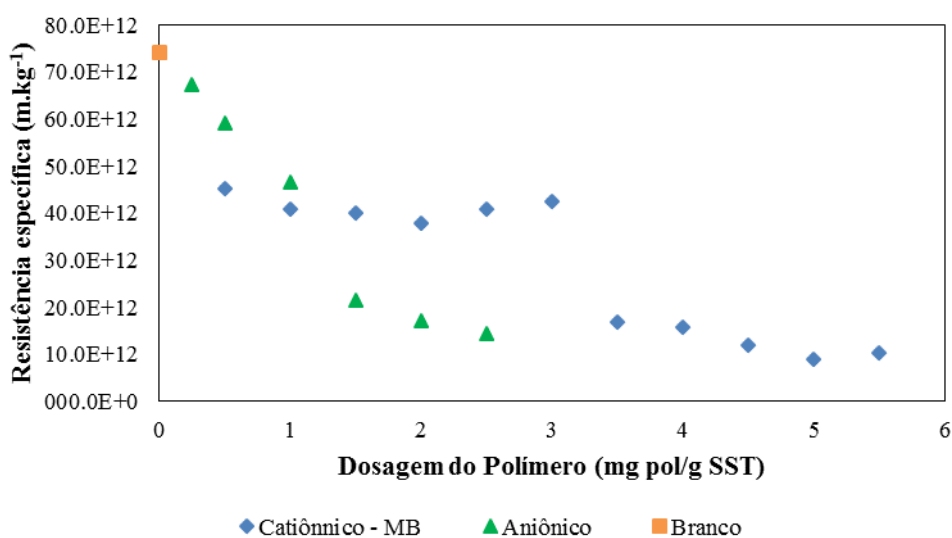


Os lodos resultantes do adensamento por sedimentação apresentaram elevados valores de resistência a filtração, com valores de 9,0E+12 m.kg⁻¹ (tratamento com 5,0 mg pol. catiônico – MB) até 74,0E+12 m.kg⁻¹(tratamento sem polímero – branco), como pode ser observado na figura 41(Apêndice F). Lodos com distintas procedências podem apresentar distintas resistência específica (SCALIZE e DI BERNARDO, 1999). De acordo com Reali (1999) os resíduos de ETAs podem chegar a apresentar valores maiores de resistência específica, na ordem de 5 x 10¹² a 70 x 10¹² m.kg⁻¹.

Os resultados de resistência específica, observado no presente estudo, demonstram a baixa capacidade de filtração do lodo. Quando mais elevado for o valor da resistência específica menor a capacidade de filtração da água (FONTANA, 2004).

Como pode ser observado na figura 41, a adição de polímero auxiliou significativamente na diminuição da resistência a filtração, para ambos os polímeros (catiônico – MB e aniônico), sendo o aumento da dosagem proporcional a diminuição da resistência a filtração.

Figura 41 - Resistência específica (kg.m^{-1}) resultante do adensamento por sedimentação para os tratamentos com polímero catiônico – MB e aniônico.



Para o polímero aniônico a resistência a filtração variou entre $67,4 \text{ m.k}^{-1}$, para dosagem de $0,25 \text{ mg pol/g SST}$, a $14,5 \text{ m.k}^{-1}$ (dosagem de $2,5 \text{ mg pol/g SST}$). Menores valores de resistência a filtração foram observados com a utilização do polímero catiônico – MB, para uma dosagem de $4,5$; $5,0$; e $5,5$, com $11,9\text{E}+12$, $9,0\text{E}+12$ e $10,3\text{E}+12 \text{ m.k}^{-1}$, respectivamente.

6.4.2.2 Ensaios adensamento por FAD com lodo da segunda coleta

Nos ensaios com lodo coletado na segunda amostragem foi avaliada a condição operacional da FAD referente as taxas de reciclo utilizadas. Com base nos ensaios preliminares de adensamento foram utilizadas diferentes dosagens do polímero catiônico –

MB e pressão de saturação de 6 atm, avaliando diferentes taxas de recirculação de 30, 40 e 50%.

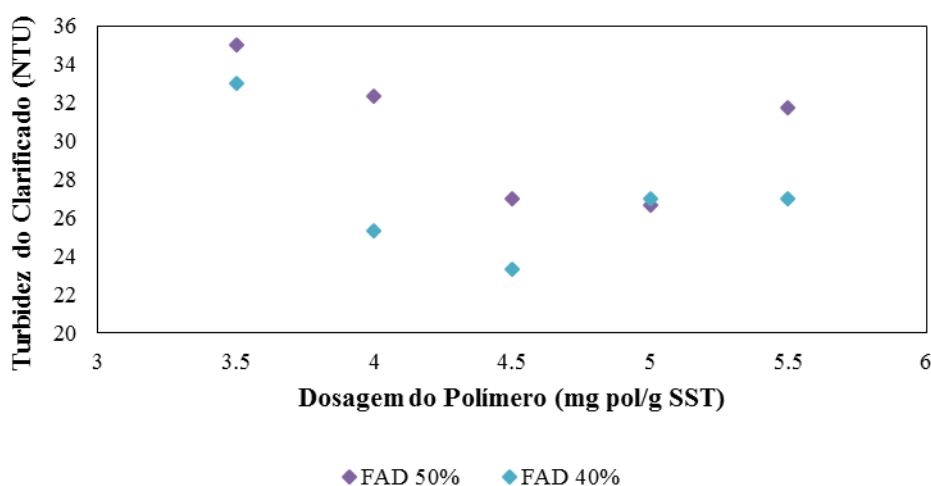
Para os ensaios com diferentes taxas de reciclo foram testadas as dosagens de polímeros catiônico – MB entre 1,5 e 5,5 mg pol/g SST. Para a taxa de reciclo que 30% não foi possível realizar a flotação completa do lodo para nenhuma das três repetições, das diferentes dosagens avaliada, sendo em todos os ensaios verificada a formação de material sedimentado no jarro de flotação.

Para a taxa de reciclo de 40% a flotação completa, nas três repetições do experimento, ocorreu quando foram empregadas as dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; e 5,0 mg pol/g SST. Com uma taxa de reciclo de 50% a efetiva flotação ocorreu para as dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST. A flotação incompleta do lodo floculado com uma dosagem de 5,5 mg pol/g SST e taxa de reciclo de 40% pode ter ocorrido devido a necessidade de uma maior quantidade de microbolhas para realizar a flotação completa, uma vez que os flocos apresentavam-se maiores e mais pesados. O aumento do tamanho do floco proporcional ao incremento da dosagem de polímero (FABRIZI et al., 2010).

Os valores de turbidez remanescente da água clarificada resultante dos ensaios de adensamento por FAD como o polímero catiônico – MB, são observados na figura 40 e no Apêndice C, o parâmetro foi analisado apenas para os ensaios que obtiveram flotação completa do lodo floculado. As taxas de reciclo de 40 e 50% mantiveram o mesmo comportamento frente a adição do polímero no processo de adensamento, apesar de apresentarem valores distintos para a turbidez remanescente da água clarificada, houve uma diminuição da turbidez até determinada dosagem.

Como pode-se observar na figura 42, no tratamento por FAD com Tr de 40% as menores turbidez remanescente foram as com dosagens de 4,0 e 4,5 mg pol/g SST, resultando em 25,3 e 23,3 NTU. Para a FAD com Tr de 50% as menores turbidez foram de 27 e 26,7 NTU, resultantes das dosagens de 4,5 e 5,0 mg pol/g SST. Sem a adição de polímero, além de flotação incompleta do lodo, a turbidez remanescente foi elevada em comparação aos demais tratamentos (Apêndice C), a FAD com Tr de 50% apresentou turbidez de 10.844,3 NTU e a FAD com Tr de 40% de 13.700 NTU.

Figura 42 - Turbidez remanescente do clarificado relacionado com as dosagens do polímero Catiônico – MB, nos ensaios experimentais de adensamento por FAD, Tr de 40% e 50% e P_{sat} de 6 atm.



As análises da série de sólidos (ST, STF, STV, SST, SSF e SSV) no lodo adensado por FAD 40 e 50% são apresentadas na tabela 21 e Apêndice G, assim como nos ensaios por sedimentação os valores correspondentes a ST apresentaram valores próximos a SST, e a porcentagem de ST em relação a STF e STV manteve-se constante entre os tratamentos com desvio padrão de 0,78.

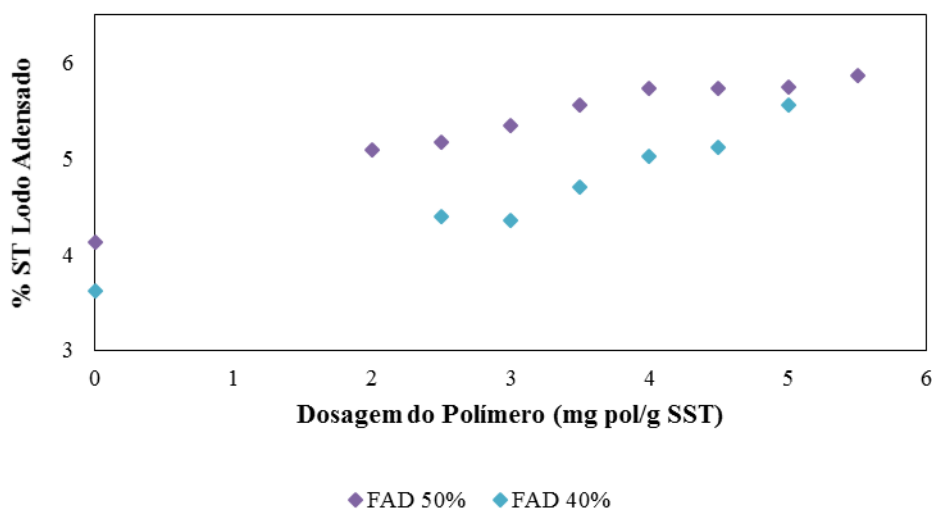
Nos ensaios de adensamento por FAD os ST apresentaram valores de 3,62 a 5,86% (Tabela 19), sendo a maior concentração de sólidos no lodo adensado foi com uma dosagem de 5,5 mg pol/g SST para a FAD 50%, e a menor concentração para o tratamento sem a utilização de polímero e com Tr de 40%.

Tabela 19 - Teor de sólidos no lodo adensado por FAD (P_{sat} de 6 atm) para diferentes dosagens de polímero Catiônico – MB, e porcentagem de ST em relação a STV e STF.

Dosagem (mg pol/g SST)	Taxa de reciclo (%)	ST (%)	STV (%ST)	STF (%ST)
0,0	50	4,13	22,57	77,43
3,5	50	5,56	21,77	78,22
4,0	50	5,73	23,14	76,86
4,5	50	5,73	25,01	74,99
5,0	50	5,75	22,78	77,22
5,5	50	5,86	23,26	76,74
0,0	40	3,62	22,54	77,46
3,5	40	4,70	23,33	76,67
4,0	40	5,02	23,40	76,60
4,5	40	5,12	22,41	77,59
5,0	40	5,56	23,69	76,31
Média		-	23,32	76,68
Desvio Padrão		-	0,78	0,78

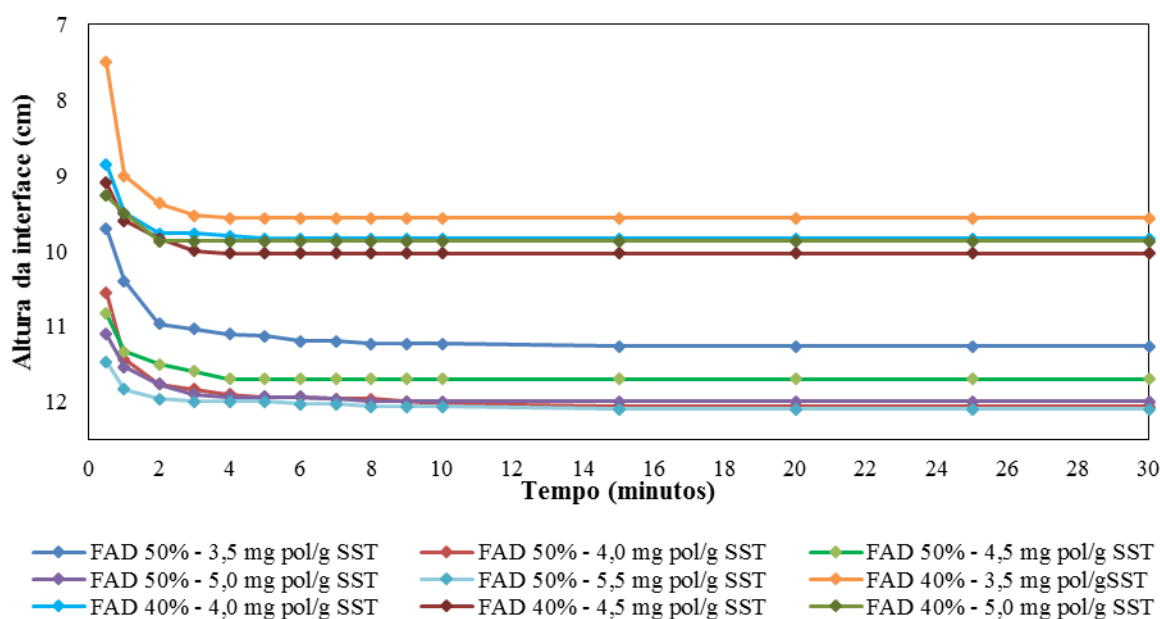
Como observado na figura 43, com o aumento da taxa de reciclo e dosagem do polímero houve um aumento da concentração de sólidos no lodo adensado.

Figura 43- Teor de sólidos totais no lodo adensado por FAD 40% e 50% relacionado com a dosagem dos diferentes polímeros catiônico – MB e aniônico.



As curvas de clarificação provenientes dos ensaios de adensamento por flotação a ar dissolvidos para as taxas de reciclo de 40 e 50% são apresentadas na figura 44, e as curvas médias de cada ensaio estão presentes no Apêndice D. Pode-se observar que o processo de flotação apresenta estabilidade na velocidade de clarificação antes dos 5 minutos de ensaio.

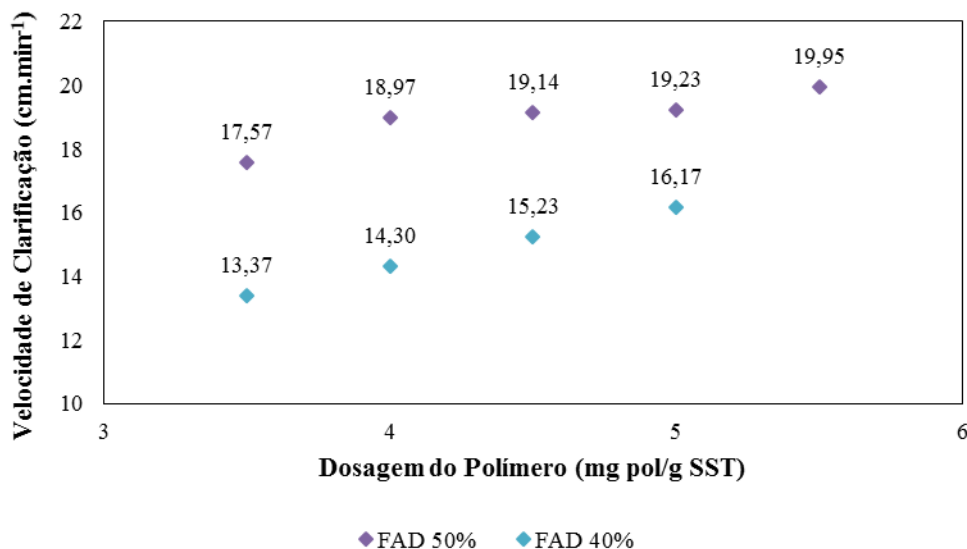
Figura 44 - Curva da interface de clarificação/adensamento do lodo com o uso de polímero catiônico – MB e Tr de 40 e 50%, para as dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol/g SST.



As velocidades de clarificação (V_{cl}) dos lodos adensados por FAD para os tratamentos com taxa de reciclo de 40 e 50%, são apresentadas na figura 45, e no apêndice E. Pode-se perceber que para ambos os tratamentos quanto mais elevada a dosagem de polímeros maior é a velocidade de clarificação, sendo as maiores velocidades de clarificação para a Tr de 50%.

Nos tratamentos sem a adição de polímero (branco) não puderam ser determinadas as velocidades de clarificação, pois a maior parte do lodo não flotou, sedimentando no fundo do jarro. Para os tratamentos com adição de polímero catiônico – MB, as velocidades máximas de clarificação ocorreram nos primeiros minutos de flotação, com estabilidade antes dos 10 minutos de adensamento. Para o tratamento com Tr de 40% a maior velocidade de clarificação foi de $16,17 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, para dosagem de $5,0 \text{ mg pol/g SST}$, e de $19,95 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, para o tratamento com $5,5 \text{ mg pol/g SST}$ e Tr de 50% (Figura 43). Em trabalho realizado por Galasso (2014) para o tratamento de águas residuais foi evidenciado que quanto maior a taxa de recirculação aplicada, maior a velocidade ascensão, com maior velocidade de clarificação para a taxa de recirculação de 20% ($10,58 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$).

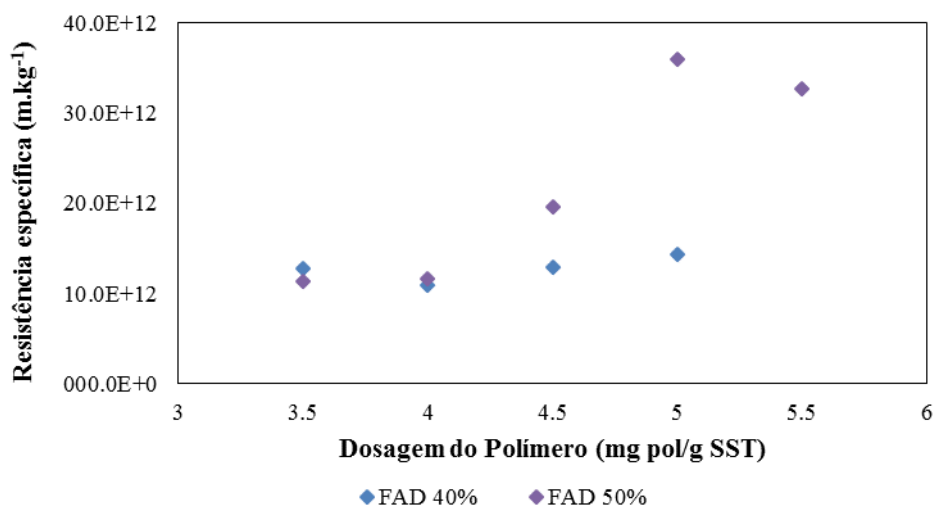
Figura 45 - Velocidade de clarificação do adensamento por FAD com Tr de 40 e 50%, para os tratamentos com polímero catiônico – MB, com dosagens de 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 e 5,5.



Os resultados dos ensaios de resistência específica, do lodo adensado por FAD 40 e 50% são apresentados na figura 46e no apêndice F. Nos ensaios sem a adição de polímero a resistência a filtração foi de $71,5E+12 \text{ m.kg}^{-1}$ para a Tr de 40%, e de $49,4E+12 \text{ m.kg}^{-1}$ para a Tr de 50%. Assim como nos ensaios por sedimentação, os lodos adensados por FAD apresentaram elevada resistência a filtração. Lodos que apresentem resistência específica inferior a $1E+12 \text{ m.kg}^{-1}$ são considerados de fácil filtrabilidade, e lodos que apresentem valor superior a $1E+12 \text{ m.kg}^{-1}$ são considerados de difícil filtração (ASCE e AWWA, 1996).

Como pode ser observado na figura 44, a adição de polímero diminuiu específica a filtração, contudo o aumento da dosagem não auxiliou na diminuição da resistência a filtração, isso pode ser explicado devido a maior compactação e teor de sólidos no lodo adensado com maiores dosagens do polímero. Para a Tr de 50% resistência a filtração variou entre $11,3E+12 \text{ m.k}^{-1}$, para dosagem de 3,5 mg pol/g SST, a $32,7E+12 \text{ m.k}^{-1}$ (dosagem de 5,5 mg pol/g SST). Utilizando Tr de 40% a resistência a filtração foi de $12,9E+12 \text{ m.k}^{-1}$, para dosagem de 3,5 mg pol/g SST e de $14,3E+12 \text{ m.k}^{-1}$ (dosagem de 5,0 mg pol/g SST). Entre todos os ensaios realizados a menor resistência a filtração foi observada para a Tr de 40%, dosagem de 4,0 mg pol/g SST ($10,9E+12 \text{ m.k}^{-1}$).

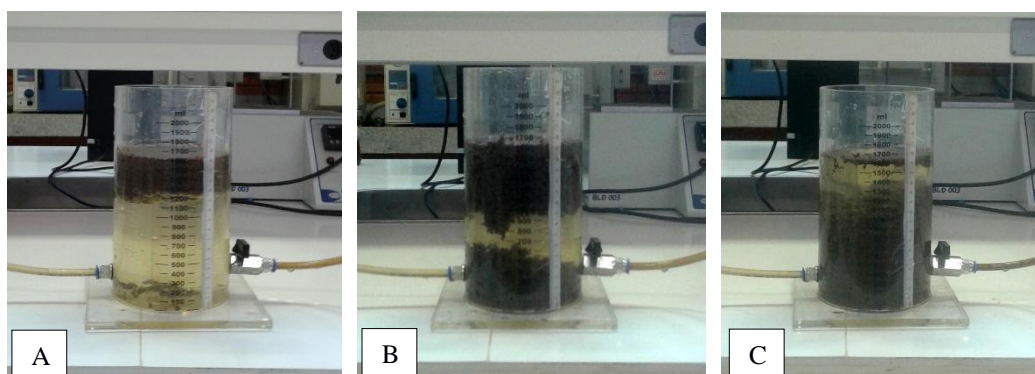
Figura 46 - Resistência específica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) resultante do adensamento por FAD 40 e 50% para os tratamentos com polímero catiônico – MB.



6.4.2.2.1 Avaliação da concentração de sólidos no processo de adensamento por FAD

Como observado na figura 47A, B e C, com o aumento da concentração de sólidos o processo de flotação foi dificultado, com a tendência em sedimentação do lodo floculado, sendo que para a concentração de $49.550 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o lodo não flutuou.

Figura 47 - Adensamento de lodo por FAD com Tr de 40%, P_{sat} de 6 atm e dosagem de $4,5 \text{ mg pol/g SST}$. A: Lodo com concentração de sólidos de $18.953 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. B: Lodo com concentração de sólidos de $25.190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. C: Lodo com concentração de sólidos de $49.550 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.



Como pode-se observar na figura 47, apenas o lodo com menor concentração de sólidos resultou em flotação completa do resíduo, evidenciando que o processo de

adensamento de lodo por FAD é limitado pela concentração de sólidos do resíduo. A maior concentração de sólidos também resultou em água clarificada com maior turbidez remanescente, como observado na tabela 20. Para uma concentração de sólidos de 18,9530 mg.L⁻¹ a turbidez média da água clarificada foi de 14,5 NTU, com o aumento da concentração de sólidos para 25.190 mg.L⁻¹ e para 49.550 mg.L⁻¹ a turbidez aumentou para 24,3 e 65 NTU, respectivamente.

Tabela 20 - Turbidez remanescente da água clarificada resultante do adensamento por FAD com Tr de 40%, Psat de 6 atm e dosagem de 4,5 mg pol/g SST, parolodo com diferentes concentrações de sólidos.

Tipo de Adensamento	Concentração de sólidos	Dosagem (mg pol/g SST)	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Turbidez 3 (NTU)	Média (NTU)
Flotação 40%	18.953 mg.L ⁻¹	4,5	16,3	15,3	12	14,5
Flotação 40%	25.190 mg.L ⁻¹	4,5	27	23	23	24,3
Flotação 40%	49.550 mg.L ⁻¹	4,5	54	70	71	65

6.4.3 Comparação entre o adensamento por sedimentação e por FAD

Na tabela 21 apresentam-se os valores médios (erro padrão) da turbidez remanescente, velocidade de clarificação e concentração de sólidos, dos ensaios de adensamento por sedimentação e flotação a ar dissolvido. A partir dos resultados apresentados na tabela 23, pode-se determinar as diferenças estatísticas dos ensaios de adensamento, entre cada parâmetro avaliado. Com relação a turbidez remanescente da água clarificada pode-se concluir que houve efeito significativo entre os tratamentos, sendo o adensamento por sedimentação realizado com 0,25 mg pol. aniônico/g SST; 0,5 e 1,0 mg pol. catiônico-MB/g SST foram estatisticamente iguais entre si, apresentados valores de turbidez intermediários (1186,7; 846; e 679 NTU).

Os ensaios de adensamento sem a utilização de polímeros (sedimentação, FAD 50 e 40%) apresentaram estatisticamente diferenças, possuindo os maiores valores de turbidez remanescente (8.593,2; 10.844,3; e 13.700 NTU). Os demais ensaios de adensamento apresentaram menor turbidez remanescente, com valores entre 23,3 e 303 NTU, mas foram considerados estatisticamente iguais devido ao elevado coeficiente de variação (21,8%) entre as análises.

Os resultados de turbidez foram comparados com os da Resolução 357/2005 do Conama que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece, no capítulo III, as condições de enquadramento baseado na qualidade das águas. É observado que o limite máximo aceitável pela legislação para o enquadramento em corpos de água doce Classe I, em relação ao parâmetro turbidez é de 40 NTU. Os ensaios de adensamento que obtiveram valores abaixo deste foram todos os ensaios realizados por FAD 40 e 50% com a utilização de polímero (tabela 23).

Com relação ao enquadramento em corpos de água doce Classe II o limite máximo para o parâmetro turbidez é de 100 NTU, deste modo inclui-se ainda, dentro do limite aceitável, os tratamentos de adensamento realizados por sedimentação para as dosagens de: 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 mg pol. catiônico - MB/g SST e 1,0; 1,5; 2,0; e 2,5 mg pol. aniônico/g SST (tabela 23). Sendo permitido o descarte do resíduo nos mananciais de Classe II.

Os tratamentos com dosagens de 0,5 mg pol. aniônico/g SST e 1,5; 2,0; e 2,5 mg pol. catiônico - MB/g SST não enquadraram na classe II, apesar de serem estatisticamente iguais ao demais. Analisando o parâmetro turbidez, salienta-se que o sobrenadante, resultante destes processos de adensamento não poderiam ser descartados em mananciais de Classe I e II.

Os resultados da análise estatística (tabela 23) também permitem concluir que houve efeito significativo no teor de sólidos entre os ensaios de adensamento realizados por sedimentação e por FAD. Os lodos que obtiveram a maior concentração de sólidos e estatisticamente iguais, foram os adensados por sedimentação, para as dosagens de 1,0 e 1,5 mg pol. catiônico - MB/g SST (7,05 e 7,10%) e 0,25 mg pol. aniônico/g SST (7,04%). Os ensaios de adensamento por sedimentação para as dosagens de 0,0; 0,5; 2,0; 2,5; e 3,0 mg pol. catiônico - MB/g SST (6,88; 6,93; 6,93; 6,89; e 6,84%) resultaram em lodos com teor de sólidos estatisticamente semelhantes, sendo a segunda maior concentração de sólidos.

Os ensaios de adensamento que resultaram em menor teor de sólidos, sendo estatisticamente iguais, foram os realizados por FAD 40 e 50% sem a utilização de polímero (3,62 e 4,13%). Já o ensaio que utilizou alguma dosagem de polímero e obteve a menor concentração de sólidos (4,7%) foi o adensado por FAD 40% para dosagem de 3,5 mg pol/g SST. Contudo o teor de sólidos (4,7%) ainda foi maior que o proposto pela literatura, que relatam que ETAs apresentam lodos adensados com teores de sólidos de 1,5 à 3% (RICHTER, 2001; DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Em trabalho realizado por Patrizzi, Reali e Cordeiro (1999) ao comparar o processo de adensamento de lodo de ETA, por sedimentação e por FAD, obteve-se um teor de sólidos no lodo adensado em torno de 7% para a flotação, e de 4,5% para a sedimentação. Porém deve-se

salientar que foram utilizadas altas taxas de recirculação na FAD, de 120%. Arora et al. (1995) ao realizar comparação entre o adensamento de lodos de ETAs por sedimentação e por FAD obteve concentração de sólidos similares em ambos os processos, contudo foram adotadas taxas de recirculação altíssimas, de até 300%, com alto custo energético no processo de adensamento.

Tabela 21 - Valores médios (erro padrão) da turbidez da água clarificada (NTU), teor de sólidos (%) e velocidade de clarificação – Vcl (m.kg⁻¹), para os ensaios de adensamento por sedimentação (polímero catiônico e aniônico) e por FAD com Tr de 40 e 50%.

Adensamento	Dosagem (mg pol/g SST)	Médias* Turbidez (NTU)(erro padrão)	Médias* Sólidos (%) (erro padrão)	Médias* Vcl (cm.min ⁻¹) (erro padrão)	
Sed. Branco	0,0	8.593,2 c (2,52)	6,88 m (0,04)	1,08 c (0,11)	
	0,5	840 b (2,52)	6,93 m (0,04)	0,44 b (0,11)	
	1,0	679 b (2,52)	7,05 n (0,04)	0,50 b (0,11)	
	1,5	303 a (2,52)	7,10 n (0,04)	0,88 b (0,11)	
	2,0	171,7 a (2,52)	6,93 m (0,04)	1,37 c (0,11)	
	2,5	122,7 a (2,52)	6,89 m (0,04)	1,52 c (0,11)	
	Sedimentação Catiônico – MB	3,0	68,3 a (2,52)	6,84 m (0,04)	2,33 c (0,11)
		3,5	49,7 a (2,52)	6,48 j (0,04)	2,74 d (0,11)
		4,0	48,3 a (2,52)	6,28 i (0,04)	5,81 e (0,11)
		4,5	46,3 a (2,52)	6,25 i (0,04)	6,23 e (0,11)
5,0		50 a (2,52)	5,87 g (0,04)	6,6 e (0,11)	
5,5		71,7 a (2,52)	5,71 f (0,04)	6,64 e (0,11)	
Sedimentação Aniônico	0,25	1.186,7 b (2,52)	7,04 n (0,04)	1,19 c (0,11)	
	0,5	275,3 a (2,52)	6,58 k (0,04)	1,56 c (0,11)	
	1,0	75,7 a (2,52)	6,40 j (0,04)	2,59 d (0,11)	
	1,5	58 a (2,52)	6,26 i (0,04)	3,77 d (0,11)	
	2,0	54,3 a (2,52)	6,02 h (0,04)	5,10 e (0,11)	
	2,5	62 a (2,52)	5,85 g (0,04)	6,69 e (0,11)	
Flot. 50% Branco	0,0	10.844,3 d (2,52)	4,13 a (0,04)	0,0 a (0,11)	
	3,5	35 a (2,52)	5,56 d (0,04)	17,57 g (0,11)	
Flotação 50%	4,0	32,3 a (2,52)	5,73 f (0,04)	18,97 g (0,11)	
	4,5	26,7 a (2,52)	5,73 f (0,04)	19,13 g (0,11)	
	5,0	26,7 a (2,52)	5,75 f (0,04)	19,23 g (0,11)	
	5,5	31,7 a (2,52)	5,86 g (0,04)	19,95 g (0,11)	
	Flot. 40% Branco	0,0	13.700 e (2,52)	3,62 a (0,04)	0,0 a (0,11)
3,5		33 a (2,52)	4,70 b (0,04)	13,37 f (0,11)	
Flotação 40%	4,0	25,3 a (2,52)	5,02 c (0,04)	14,3 f (0,11)	
	4,5	23,3 a (2,52)	5,12 c (0,04)	15,23 f (0,11)	
	5,0	27 a (2,52)	5,56 d (0,04)	16,17 f (0,11)	

*Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si, considerando o valor nominal de 5% de significância.

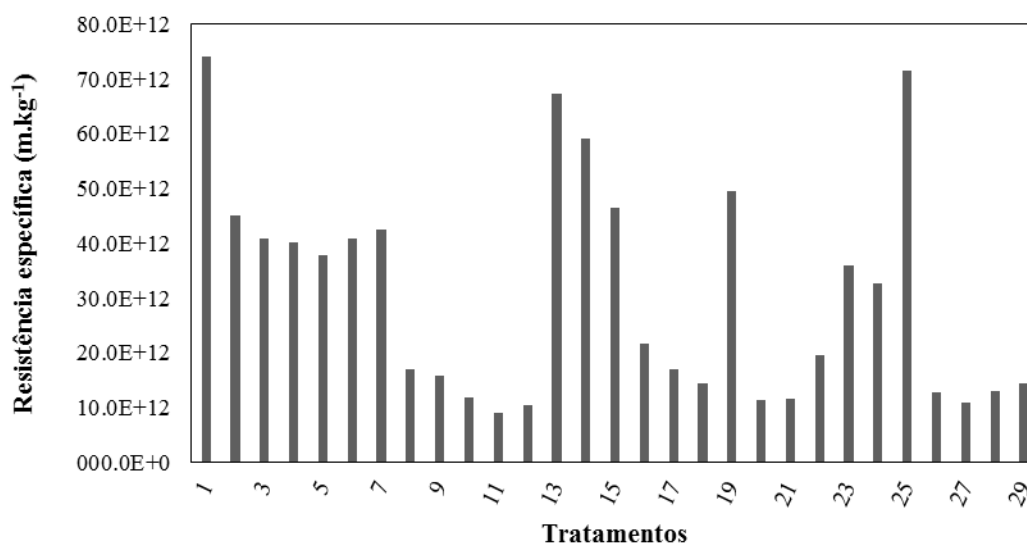
As velocidades de clarificação do lodo adensado os para distintos ensaios apresentaram diferença significativa entre os tratamentos (tabela 21). O lodo adensado por FAD 50% apresentou velocidade de clarificação superior aos demais tratamentos, porém entre as dosagens (3,5; 4,0; 4,5; 5,0; e 5,5 mg pol./g SST) foram estatisticamente iguais (17,57; 18,97; 19,13; 19,23; 19,95 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$). Os ensaios com FAD 40% se diferiram entre os mais, com a segunda maior velocidade de clarificação, mas também foram estatisticamente iguais entre as repetições.

As menores velocidades de clarificação foram para os tratamentos por sedimentação, sendo as dosagens de 0,5; 1,0 e 1,5 mg pol. catiônico – MB/g SST, estaticamente iguais (0,44; 0,50; e 0,88 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$). A segunda menor velocidade de clarificação entre os tratamentos se deu para os tratamentos por sedimentação sem a utilização de polímeros (branco) e para as dosagens 2,0; 2,5; 3,0 e 1,5 mg pol. catiônico – MB/g SST e de 0,25 e 0,5 mg pol. aniônico/g SST.

Os ensaios de resistência específica do lodo para todos os tratamentos realizados são apresentados na figura 48, pode-se observar que os tratamentos com baixas dosagens de polímero ou que não utilizaram nenhuma dosagem de polímero apresentaram maior resistência a filtração (tratamentos: 1, 13, 14, 19 e 25).

Os ensaios de adensamento que resultaram em lodo com menor resistência específica foram os tratamentos 10, 11, 12, 20, 21 e 27, que resultaram em resistência a filtração de $11,9\text{E}+12$; $9,0\text{E}+12$; $10,3\text{E}+12$; $11,3\text{E}+12$; $11,6\text{E}+12$ e $10,9\text{E}+12$ $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$. A resistência a filtração está diretamente relacionada com as características do floco formado durante o processo de adensamento. Sendo melhores filtrações realizadas com flocos porosos, fortes e permeáveis (OYEGBILEA e NARRAA, 2016).

Figura 48 - Resistência específica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) resultante do adensamento por sedimentação (polímero catiônico – MB e aniônico) e por FAD com Tr de 40 e 50%.



Legenda	
1 - Sedimentação 0,0 mg pol./g SST (branco)	16 - Sedimentação 1,5 mg pol./g SST (aniônico)
2 - Sedimentação 0,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	17 - Sedimentação 2,0 mg pol./g SST (aniônico)
3 - Sedimentação 1,0 mg pol./g SST (catiônico MB)	18 - Sedimentação 2,5 mg pol./g SST (aniônico)
4 - Sedimentação 1,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	19 - Flotação 50% 0,0 mg pol./g SST (branco)
5 - Sedimentação 2,0 mg pol./g SST (catiônico MB)	20 - Flotação 50% 3,5 mg pol./g (catiônico MB)
6 - Sedimentação 2,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	21 - Flotação 50% 4,0 mg pol./g (catiônico MB)
7 - Sedimentação 3,0 mg pol./g SST (catiônico MB)	22 - Flotação 50% 4,5 mg pol./g (catiônico MB)
8 - Sedimentação 3,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	23 - Flotação 50% 5,0 mg pol./g (catiônico MB)
9 - Sedimentação 4,0 mg pol./g SST (catiônico MB)	24 - Flotação 50% 5,5 mg pol./g (catiônico MB)
10 - Sedimentação 4,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	25 - Flotação 40% 0,0 mg pol./g (catiônico MB)
11 - Sedimentação 5,0 mg pol./g SST (catiônico MB)	26 - Flotação 40% 3,5 mg pol./g (catiônico MB)
12 - Sedimentação 5,5 mg pol./g SST (catiônico MB)	27 - Flotação 40% 4,0 mg pol./g (catiônico MB)
13 - Sedimentação 0,25 mg pol./g SST (aniônico)	28 - Flotação 40% 4,5 mg pol./g (catiônico MB)
14 - Sedimentação 0,5 mg pol./g SST (aniônico)	29 - Flotação 40% 5,0 mg pol./g (catiônico MB)
15 - Sedimentação 1,0 mg pol./g SST (aniônico)	

Com base nos ensaios de adensamento realizados em escala de bancada e os parâmetros obtidos como resposta para cada tratamento observa-se que os melhores resultados para cada parâmetro se divergiram entre os tratamentos, deste modo dependendo da realidade e as respostas almejadas pela ETA, para o sistema de tratamento de lodo, deve-se optar por um ou outro método de tratamento.

Os resultados apresentados nos ensaios de adensamento com água clarificada de menor turbidez remanescente e maior velocidade de clarificação, foram obtidos a partir dos ensaios de adensamento por FAD, sem diferença estatística entre as dosagens. Contudo o lodo com maior concentração de sólidos foi proveniente ao tratamento por sedimentação com baixa dosagem de polímero. Já quando se busca uma menor resistência a filtração, a sedimentação com dosagens mais elevadas apresentou o melhor resultado.

De modo geral também observou-se que as mesmas dosagens de polímeros catiônico – MB não responderam a comportamentos equivalentes entre os tratamentos de sedimentação e FAD, pois cada tratamento requer flocos com características distintas. No processo de sedimentação os flocos devem ser densos, grandes e com forma esférica regular, já para a flotação os flocos devem ser de baixa densidade e com tamanhos medianos (SENGUPTA; ATTIA e HAMZA, 1994).

7 CONCLUSÃO

A quantificação da geração global de lodo por meio de equação empírica e medição *in loco* não diferiram entre si, demonstrando que o modelo proposto pela literatura pode se equivaler ao determinado em campo. Contudo salienta-se que a realidade das ETAs pode diferir entre si, sendo necessário a investigação individualizada de cada caso.

A caracterização qualitativa do lodo da ETA em estudo demonstrou que este resíduo constitui-se principalmente de sólidos em suspensão, apresentando elevada contagem para Coliforms e alta fração de material inerte. A baixa biodegradabilidade foi evidenciada pela baixa relação DBO/DQO e altas proporções de STF e SSF em relação a ST e SST.

Em relação à classificação do resíduo segundo a NBR 10.004 de 2004, o lodo da ETA de São Gabriel foi classificado como resíduo Classe II A – Não Inerte, por apresentar concentrações de alumínio, ferro e manganês superiores aos limites estabelecidos pela norma, para extratos solubilizados (Anexo G da NBR 10.004 de 2004).

Os ensaios em teste de jarros com os cinco tipos de polímeros possibilitaram sintetizar a utilização destes nos ensaios de adensamento. Selecionou-se o polímero catiônico com muito baixa densidade da carga em ambos os lodos coletados. O polímero não-iônico, apenas no lodo da primeira coleta e o polímero aniônico nos ensaios de adensamento da segunda coleta.

Os resultados obtidos nos ensaios preliminares de adensamento forneceram subsídios e parâmetros importantes para a realização dos ensaios de adensamento com o lodo da segunda coleta, especialmente: em relação aos procedimentos metodológicos; comportamento do lodo floculado frente ao adensamento; e a utilização de polímeros no adensamento.

A utilização dos polímeros diminuiu a turbidez remanescente da água clarificada nos ensaios de adensamento por sedimentação e por FAD, contudo a partir da dosagem ótima verificou-se um acréscimo da turbidez remanescente.

Nos ensaios de adensamento por sedimentação evidenciou-se que a maior concentração de sólidos no lodo adensado não remete a maior dosagem de polímero, sendo que a partir da dosagem ótima com o aumento do polímero à concentração de sólidos decai proporcionalmente. Contudo a concentração de sólidos no adensamento por FAD aumento com taxa de reciclo e dosagem do polímero.

A velocidade de clarificação no adensamento por sedimentação e por FAD aumentou com o acréscimo da dosagem dos polímeros. Na FAD a velocidade de clarificação apresentou estabilidade antes dos 5 minutos de ensaio para os ensaios.

A resistência específica no lodo adensamento por sedimentação e por FAD, foram elevadas, demonstram a baixa capacidade de filtração do lodo, contudo a adição de polímeros auxiliou na diminuição da resistência específica.

A avaliação da condição operacional da FAD, referente as taxas de reciclo, apresentou flotação incompleta do lodo em alguns ensaios, o que pode ter ocorrido devido à necessidade de uma maior taxa de reciclo.

Na comparação do adensamento do lodo da ETA estudada por meio da análise estatística, pode-se perceber que os melhores resultados dos parâmetros analisados diferiram entre os tipos de tratamento (sedimentação e flotação) e entre as dosagens dos polímeros.

Os resultados obtidos nos ensaios de adensamento para água clarificada de menor turbidez remanescente e maior velocidade de clarificação, foram obtidos a partir dos ensaios de adensamento por FAD, sem diferença estatística entre as dosagens. Contudo o lodo com maior concentração de sólidos foi proveniente ao tratamento por sedimentação com baixa dosagem de polímero. Quando se busca uma menor resistência a filtração, a sedimentação com dosagens mais elevadas apresentou o melhor resultado, com menor resistência específica.

Faz-se necessário antes da tomada de decisão para a escolha do processo de adensamento, tipo de polímero e dosagem utilizada, determinar quais serão os processos subsequentes de tratamento do lodo, e quais os parâmetros são mais relevantes dentro da realidade da ETA. Deve-se ainda considerar os custos, a área disponível e pessoal qualificado antes de optar pelo emprego do adensamento do lodo por sedimentação ou por FAD.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sequência desta dissertação são sugeridas as seguintes recomendações:

- Além do parâmetro turbidez realizar a caracterização de parâmetros físico-químicos e microbiológicos na água clarificada resultante do processo de adensamento. Fundamental para determinar o potencial de recirculação e incorporação com a água bruta;
- Realizar análise econômica dos processos de adensamento do lodo por sedimentação e flotação a ar dissolvido;
- Desenvolvimento de estudos subsequentes ao adensamento do lodo, realizando ensaios de desaguamento mecânico e natural. Avaliando desta forma todo o processo de tratamento do lodo;
- Realizar ensaios de otimização das etapas de tratamento por adensamento e desaguamento;
- Propor e avaliar alternativas viáveis para a disposição e reutilização do lodo de ETAs, após a realização de tratamento do lodo.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.

ACHON, C. L.; SOARES, L. V.; MEGDA, C. R. Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água. **Anais...** In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Leito de drenagem: sistema natural para redução de volume de lodo de estação de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 13, n.1, p. 54 – 62, 2008.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 18, n. 2, p. 115 – 122, 2013.

AFEE- Association Francaise Pour L'etude Des Eaux. **Traitment des boues de stations de production d'eau potable**. AFEE, 1993.

ALMEIDA, G. N.; GONÇALVES, M. C.; GUIMARÃES, S. A. Z. Utilização do teste de resistência específica na operação de filtros prensa. **Revista DAE - SABESP**, v. 51, n. 160, p. 20 - 26, 1991.

AMIRTHARAJAH, A. The mechanisms of coagulation. **Anais...**In: Seminário nacional sobre coagulação e filtração direta. São Carlos, 1989.

ANDRADE, C. F; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, F. de. C. Gestão Ambiental em Saneamento: Uma Revisão das Alternativas para Tratamento e Disposição do Lodo de ETA e seus Impactos na Qualidade das Águas. **Anais...** In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte. 2014.

APHA – American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed., Washington: APHA-AWWA-WEF, 2012.733 p.

ARORA, H.; DE WOLFE, J. R.; LEE, R. G.; GRUBB, T. P. Evaluation of dissolved air flotation process for water clarification and sludge thickening. **Water Science and Technology**. v. 31, p. 137 – 147, 1995.

ASHBROOK, Simon-Hartley. 2015. Disponível em: <<http://www.nei.com.br/produto/2008-05-adensador-de-tambor-rotativo-centriquip-do-brasil-ltda?id=e3a22246-5ba7-11e4-8697-0e94104de12e>>. Acesso em: 07 de julho de 2015.

AYOL, A.; DENTEL, S. K.; FILIBELI, A. Dual Polymer Conditioning of Water Treatment Residuals. **Journal of Environmental Engineering**. v. 131, 8 ed. p. 1132 – 1138, 2005.

AWWA –American Water Works Association. **Water treatment plant wastemanagement**. American Water Works Association Research Foundation. Denver, 1987, 459 p.

BABATUNDE, A.O.; ZHAO, Y.Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial re-uses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129 – 164, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 de agosto de 1981.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 08 de janeiro de 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de fevereiro de 1998.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de março de 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 11.445 de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 de janeiro de 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 de agosto de 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 de dezembro de 2011.

BONTON, A; BOUCHARD, C.; BARBEAU, B.; JEDRZEJAK, S. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. **Desalination**. v. 284, p. 42 – 54, 2012.

CENTURIONE FILHO, P. L.; DI BERNARDO, L. Ozonização, coagulação, floculação, flotação e filtração para remoção de algas. **Anais...** In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000.

CIZINSKÁ, S.; MATEJO, V; WASE, C.; KLASSON, Y.; KREJCI, J.; DALHAMMAR, G. Thickening of waste activated sludge by biological flotation. **Water Research**. v. 26, n. 2 p. 139 – 144, 1992.

CORDEIRO, J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas**. 1993. 342 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs**. In: REALI, M. A. P. (Coordenador). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 p.

CORDEIRO, J. S. **Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs)**. In: ANDREOLI, C. V. (Coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 2001. 282 p.

CORNWELL, D. A. **Water treatment residuals engineering**. Denver: AWWA - Research Foundation and American Water Works Association, 2006.

DE SOUZA, L. M.; SCALIZE, P. S. Resistência específica do material sedimentado em ensaio de Jar Test, obtido com a adição de lodo de Estação de Tratamento de Água. **Revista Brasileira de Engenharia Química**. v. 29, n. 3, p. 44 – 50, 2013.

DENTEL, S. K.; ABU-ORF, M. M.; GRISKOWITZ, N. J. **Guidance manual for polymer selection in wastewater treatment plants**. Water Environment Research Foundation. Alexandria: Publ. No. D0013, 1993.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v. I e II. São Paulo: Rima, 2005. 1565p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2011. 454 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012. 540 p.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Rima, 2002. 237 p.

ECOSAN. Disponível em: <<http://www.ecosan.com.br/>>. Acesso em: 02 de março de 2015.

EDZWALD, J.K., WINGLER, B.J. Chemical and physical aspects of dissolved airflotation for the removal of algae. **Jour. Water SRT - Aqua**, v.39, p. 24-35, 1990.

FABRIZI, L.; Jeferson, B.; Parsons, A. W.; WETHERILL, A.; JARVIS, P. The role of polymer in improving floc strength for filtration. **Environ. Sci. Technol.** v. 44, p. 6443–6449, 2010.

FERREIRA, B.O.; VIANNA, M. R. Eficiência do desaguamento de lodos de decantadores e água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis: estudo de caso. **Anais...** In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, 2013.

FERREIRA FILHO, S.S. Pré-condicionamento de lodos de estações de tratamento de água visando o seu adensamento por gravidade. **Anais...** XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, 1997.

FONTANA, A. O. **Sistema de leito de drenagem e sedimentador como solução para redução de volume de lodo de decantadores e reuso de água de lavagem de filtros – Estudo de caso ETA Cardoso.** 2004. 161 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GALASSO, H. L. **Remoção de sólidos suspensos totais da água do cultivo superintensivo de *litopenaeus vannamei* com biofloclo pelo método de flotação por ar dissolvido.** 2014. 54 f. Dissertação (Mestre em Aquicultura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GUERRA, R. C.; ANGELIS, D. F. Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário. **Arquivos do Instituto Biológico.**v.72, n. 1, p. 87 – 91, 2005.

GUIMARÃES, G. C. **Estudo do adensamento e desidratação dos resíduos gerados na ETA – Brasília.** 2007. 118 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007. 118 p.

HAN, M.; KIM, T.; KIM, J. Effects of floc and bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process. **Water Science and Technology.** v. 56, n. 10, p. 109 – 115, 2007.

HUBER TECHNOLOGY. Disponível em: <<http://www.huber-technology.com/>>. Acesso em: 02 de julho de 2015.

IE/SP – Instituto de Engenharia de São Paulo. Relatório de Conclusões do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água. **Anais...** In: Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água. São Paulo, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.**Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2010.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.>>. Acesso em: 14 de Mai. de 2015.

JANUÁRIO, G. F.; FERREIRA FILHO, S. S. Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**.v.12, n. 2, p. 117 - 126, 2007.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 139f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KAWAMURA, S. **Integrated desing and opeeration of Water Treatment Facilities**. New York, NY, John Wiley & Sons Inc., 2ª ed, 2000.

MATTOS, M. R. U.; GIRARD, L. Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. n. 28, p. 34 – 43, 2013.

METCALF; EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4ª ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2003. 1819 p.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Método para determinação de distribuição de tamanho de microbolhas (DTMB) em sistemas flotação (FAD) para tratamento de águas utilizando a análise de imagem digital. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 12, n. 3, p. 273 - 283, 2007.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. **Journal of Cleaner Production**. v. 96, p. 272 - 281, 2015.

NUNES, P. N.; SOBRINHO, P. A. Dimensionamento de adensadores por gravidade. **Anais...** In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2002.

OLIVEIRA, C. A. de; BARCELO, W. F. Caracterização físico-química da água de lavagem de filtro da ETA Anápolis/GO. **Anais...** In: II Simpósio Nacional Espaço, Economia e Políticas Públicas. Goiás, 2012.

OYEGBILEA, B.; AY, P.; NARRAA, S. Optimization of physicochemical process for pre-treatment of fine suspension by flocculation prior to dewatering, Desalination and Water Treatment. v. 57, p. 2726 - 2736, 2016.

PAIVA, M. W.; PARREIRA, R. L. Resíduos das estações de tratamento de água (ETA). **Linguagem Acadêmica**. v. 2, n. 2, p. 83 - 96, 2012.

PATRIZZI, L. J.; REALI, M. A. P.; CORDEIRO, J. S. Redução de volume de lodo gerado em decantadores de estação de tratamento de água utilizando espessamento por flotação e por gravidade. **Anais...** In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1999.

PCJ –Consórcio das Bacias Hidrográficas Piracicaba, Capivari e Jundiá. Oficina – Estudo de viabilidade para instalação e operação de centrais de lodos nas Bacias PCJ. 2011. Disponível em: <<http://agua.org.br/oficina-estudo-de-viabilidade-para-instalacao-e-operacao-de-centrais-de-lodos-nas-bacias-pcj/>>. Acesso em: 16 de Fev. de 2016.

REALI, M. A. P. **Principais características qualitativas e quantitativas do lodo de ETAs.** In: REALI, M. A. P. (Coordenador). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 p.

RIBEIRO, F. L. de M. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito – MG.**2007. 115 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estação de tratamento de água.** 1 ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2001.102 p.

RICHTER, C. A. **Água métodos e tecnologia de tratamento.** São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 340 p.

RIJK, S. E. de; GRAAF, J. H. M. V.; BLANKEN, J. G. D. Bubble size in flotation thickening. **Water Research.**v. 28, n. 2, p. 465 - 473, 1994.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno porte.** 509 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SABOGAL-PAZ, L. P.; DI BERNARDO, L. Aspectos conceituais relativos à seleção das tecnologias de tratamento e de disposição dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água. **Anais...** In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, 2005.

SALES, A.; SOUZA, F. R. de Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials.**v. 23, p. 2362 – 2370, 2009.

SARON, A.; LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. **Anais...** In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 2001.

SCALIZE, P. S.; DI BERNARDO, L. Clarificação da água de lavagem de filtros rápidos e caracterização do sobrenadante e lodo. **Anais...** In: XXVI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Lima – Peru, 1998.

SCALIZE, P. S.; DI BERNARDO, L. Resistência específica de lodo obtido em ensaio de clarificação, por sedimentação, da água de lavagem de filtros rápidos de ETAs. **Engenharia Sanitária e Ambiental.** vol. 4, n. 1 e 2, p. 48 - 54 ,1999.

SENGUPTA, D. K.; ATTIA, Y. A.; HAMZA, H. A. Hamza, Enhanced Filtration and Dewatering of Sludge by Flocculation, Fluid Part. Sep. J. v. 7, p. 166–171, 1994.

SHER, F.; MALIK, A.; LIU, H.; Industrial Polymer Effluent Treatment by Chemical Coagulation and Flocculation. J. Environ. Chem. Eng. v. 1, p. 684 – 689, 2013.

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem / secagem com manta geotêxtil.** 136 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

TARTARI, R.; DÍAZ-MORA, N.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica.** v. 57, p. 288 – 293, 2011.

VANACÔR, R. N. **Avaliação do coagulante *Veta Organic* utilizado em uma estação de tratamento de água para abastecimento público.** 2005. 188 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VERRELLI, D. I.; DIXON, D. R.; SCALES, P. J. Assessing dewatering performance of drinking water treatment sludges. **Water Research.** v. 44, p. 152 – 1552, 2010.

Watanabe, Y.; Tanaka, K. Innovative sludge handling through pelletization/thickening. **Water Research.** v. 33, p. 3245–3252, 1999.

YUZHU, W. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso.** 1996. 419 f. Dissertação.(Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. p. 419.

ZHAO, Y. Q. Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge I: analyses of settling curves. **Separation and Purification Technology.** v. 35, p. 71 – 80, 2004a.

ZHAO, Y. Q. Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge II: effects of floc structure and floc packing. **Separation and Purification Technology.** v. 35, p. 175 – 183, 2004b.

APÊNDICE A – TURBIDEZ REMANESCENTE DA ÁGUA CLARIFICADA NOS ENSAIOS DE PRELIMINARES ADENSAMENTO.

Turbidez remanescente da água clarificada nos ensaios preliminares de adensamento por sedimentação.

Tipos de Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	Turbidez remanescente (NTU)
Branco	0	168
	1	158
Catiônico MB	2	71,2
	3	30,4
	3,5	22,1
	4	16,9
	4,5	10,4
	0,5	53,1
Não-Iônico	1	42,8
	1,5	42,5
	2	43

Turbidez remanescente da água clarificada nos ensaios preliminares de adensamento por flotação a ar dissolvido.

Tipos de Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	Taxa de reciclo (%)	Pressão de Saturação (atm)	Turbidez remanescente (NTU)
Catiônico MB	0	30	6	181
Catiônico MB	0	50	6	162
Catiônico MB	0	100	6	117
Catiônico MB	4	40	6	6,76
Catiônico MB	4,5	40	6	6,6
Catiônico MB	5	40	6	7,55
Catiônico MB	5,5	40	6	9,95
Catiônico MB	4,5	40	6	4,47
Catiônico MB	4,5	40	5,5	5,17
Catiônico MB	4,5	40	5	4,87

APÊNDICE B – ANÁLISE DA SÉRIE DE SÓLIDOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES DE ADENSAMENTO POR FAD.

Resultado da análise da série de sólidos nos ensaios preliminares de adensado por flotação a ar dissolvido, para as distintas dosagens de polímeros, taxa de reciclo e pressão de saturação.

Tipo de Polímero	Dosagem (g pol/g SST)	Taxa de reciclo (%)	Pressão de Saturação (atm)	ST (mg/L)	STV (mg/L)	STF (mg/L)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
Catiônico MB	0	30	6	33.322	7.181	26.141	37.016	8.400	28.616
	0	40	6	34.190	7.426	26.764	24.533	5.866	18.666
	0	50	6	35.708	7.654	28.054	38.066	10.300	27.766
	0	100	6	38.459	8.648	29.811	40.933	9.316	31.616
	4	40	6	43.134	9.123	34.011	49.333	12.983	36.350
	4.5	40	6	46.351	9.979	36.372	49.283	12.050	37.233
	5	40	6	51.126	11.426	39.700	52.516	11.716	40.800
	5.5	40	6	38.613	8.596	30.017	38.650	9.166	29.483
	4.5	40	6	46.707	9.479	37.228	48.916	10.533	38.383
	4.5	40	5,5	47.587	8.726	38.861	46.716	9.683	37.033
	4.5	40	5	41.533	8.294	33.239	42.966	11.616	31.350

APÊNDICE C – TURBIDEZ REMANESCENTE DA ÁGUA CLARIFICADA NOS ENSAIOS DE EXPERIMENTAIS ADENSAMENTO.

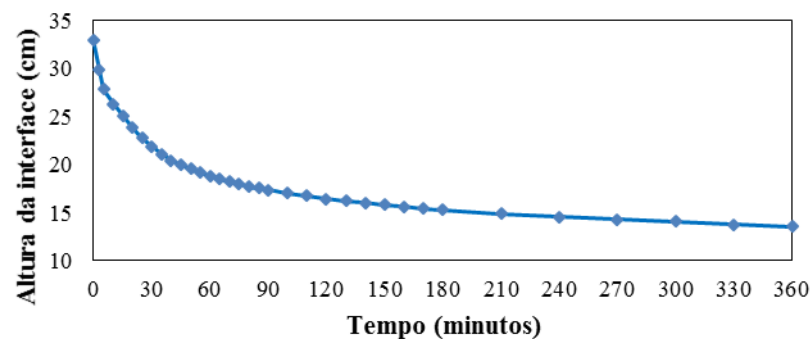
Turbidez remanescente da água clarificada, média e desvio padrão, nos ensaios experimentais de adensamento por sedimentação e por FAD.

Tipo de Adensamento	Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	Turbidez 1 (NTU)	Turbidez 2 (NTU)	Turbidez 3 (NTU)	Média (NTU)	Desvio Padrão
Sedimentação	Branco	0,0	7.298	9.556,5	8.925	8.593,2	863,44
	Catiônico MB	0,5	650	820	1.050	840	140,00
	Catiônico MB	1,0	800	658	579	679	80,67
	Catiônico MB	1,5	246	552	111	303	166,00
	Catiônico MB	2,0	313	136	66	171,7	94,22
	Catiônico MB	2,5	245	73	50	122,7	81,56
	Catiônico MB	3,0	62	83	60	68,3	9,78
	Catiônico MB	3,5	54	52	43	49,7	4,44
	Catiônico MB	4,0	45	53	47	48,3	3,11
	Catiônico MB	4,5	44	49	46	46,3	1,78
	Catiônico MB	5,0	54	53	43	50	4,67
	Catiônico MB	5,5	94	72	49	71,7	15,11
	Aniônico	0,25	603	1.022	1.935	1.186,7	498,89
	Aniônico	0,5	98	648	80	275,3	248,44
	Aniônico	1,0	53	110	64	75,7	22,89
	Aniônico	1,5	52	73	49	58	10,00
	Aniônico	2,0	49	56	58	54,3	3,56
	Aniônico	2,5	69	63	54	62	5,33
Flotação 50%	Branco	0,0	12.900	12.133	7.500	10.844,3	2.229,56
	Catiônico MB	3,5	36	37	32	35	2,00
	Catiônico MB	4,0	32	30	35	32,3	1,78
	Catiônico MB	4,5	24	27	29	27	1,78
	Catiônico MB	5,0	25	26	29	26,7	1,56
	Catiônico MB	5,5	27	32	36	31,7	3,11
Flotação 40%	Branco	0,0	14.150	13.600	13.350	13.700	300,00
	Catiônico MB	3,5	25	38	36	33	5,33
	Catiônico MB	4,0	24	26	26	25,3	0,89
	Catiônico MB	4,5	23	23	24	23,3	0,44
	Catiônico MB	5,0	25	26	30	27	2,00
	Catiônico MB	5,5	27	26	28	27	0,67

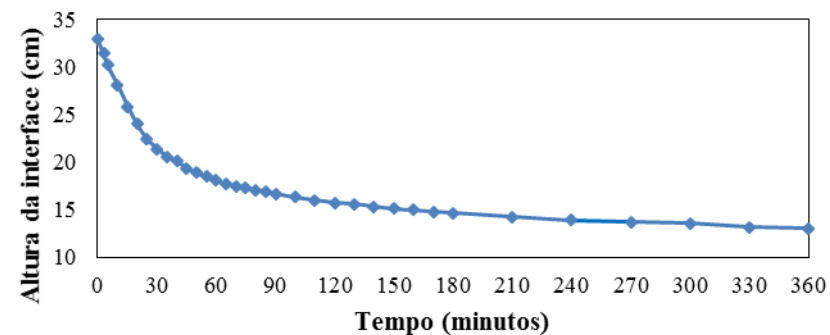
APÊNDICE D - CURVAS MÉDIAS DOS ENSAIOS DE CLARIFICAÇÃO

Curvas dos ensaios de adensamento por sedimentação para as diferentes dosagens dos polímeros catiônico – MB e aniônico.

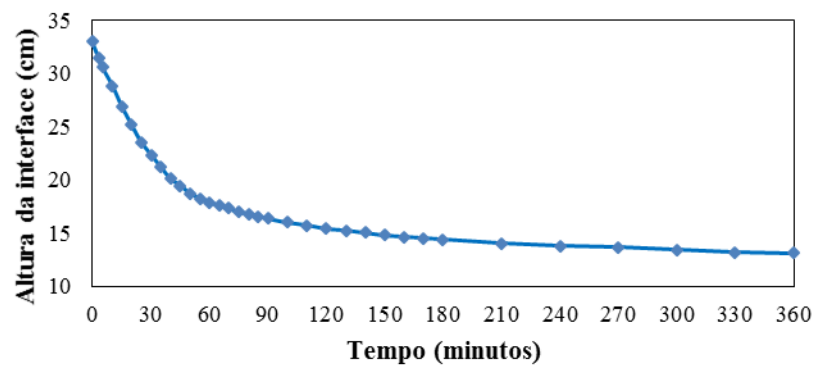
Curva Adensamento por Sedimentação -
Branco 0 mg pol/g SST



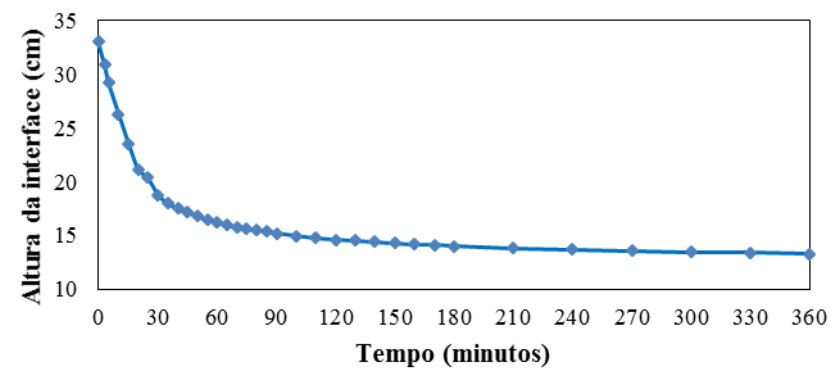
Curva Adensamento por Sedimentação
0,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



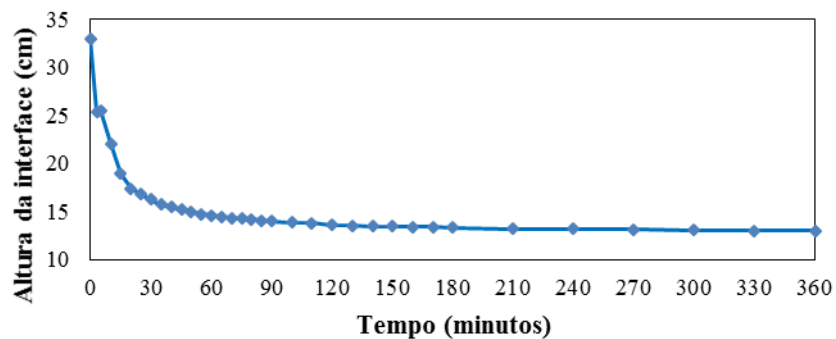
Curva Adensamento por Sedimentação 1,0
mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



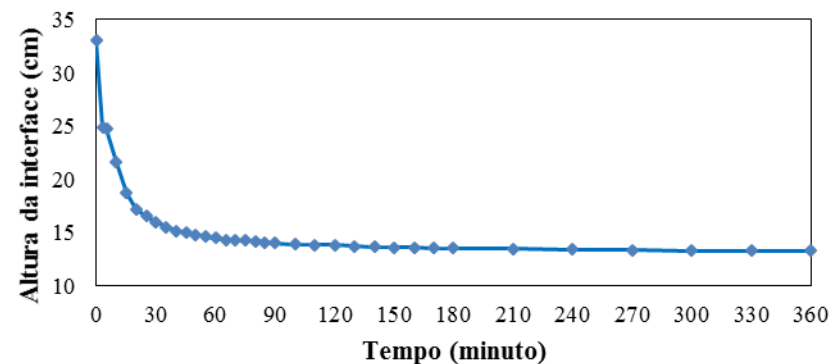
Curva Adensamento por Sedimentação 1,5
mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



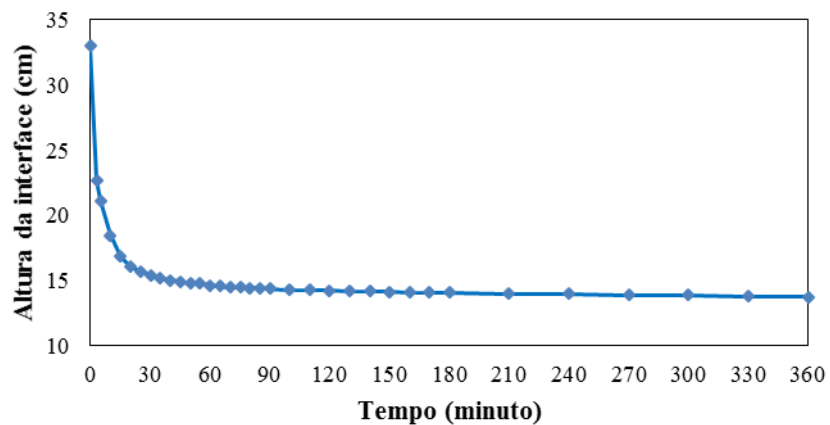
Curva Adensamento por Sedimentação
2,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



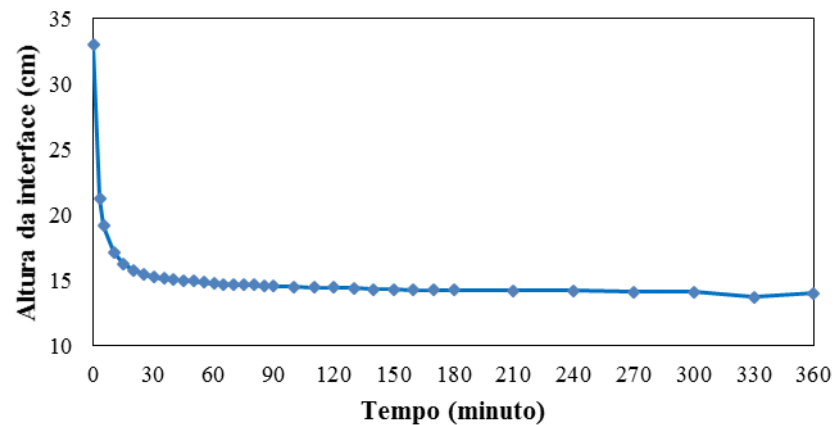
Curva Adensamento por Sedimentação
2,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



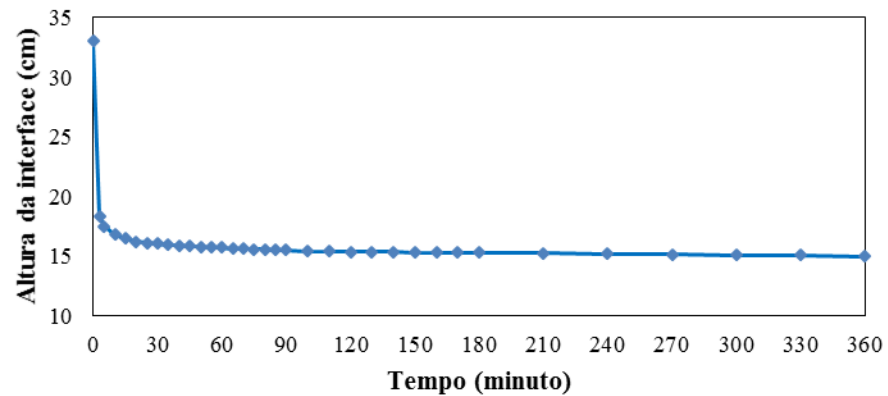
Curva Adensamento por Sedimentação
3,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



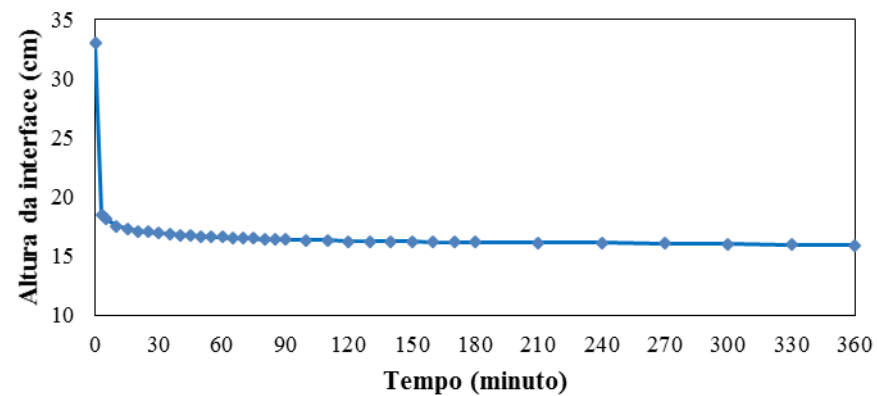
Curva Adensamento por Sedimentação
3,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



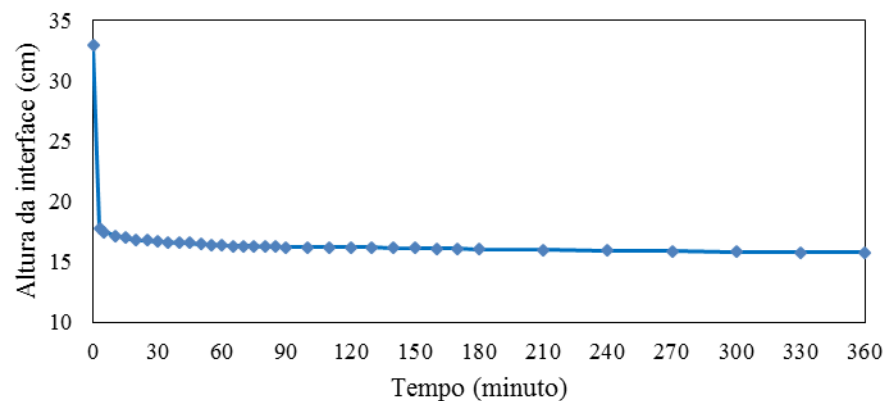
Curva Adensamento por Sedimentação
4,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



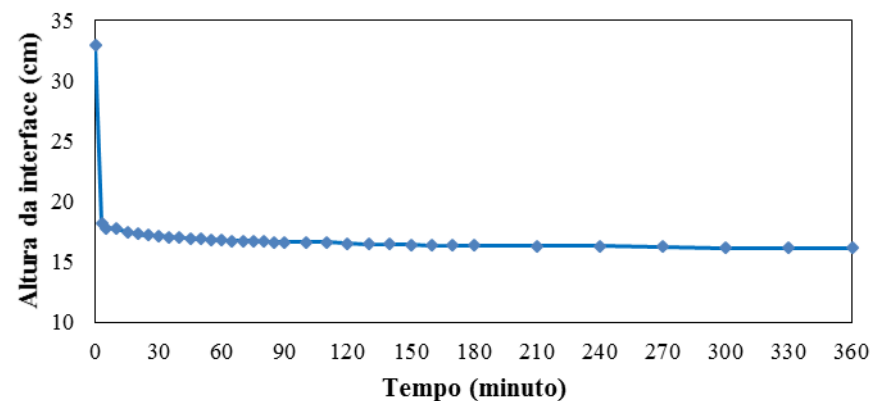
Curva Adensamento por Sedimentação
4,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



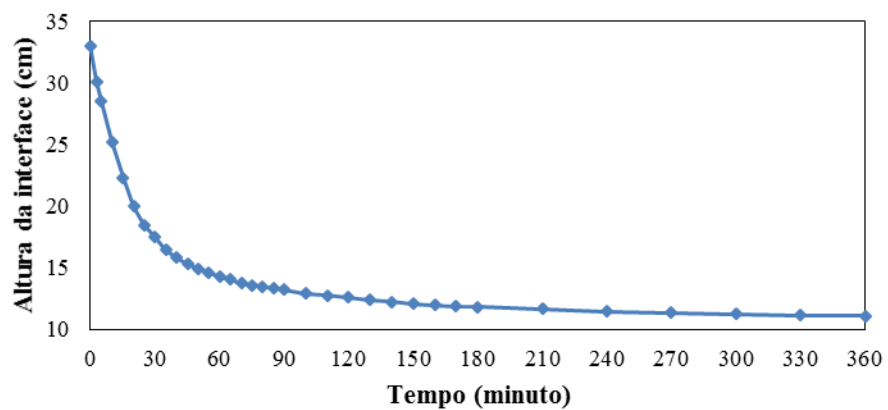
Curva Adensamento por Sedimentação
5,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



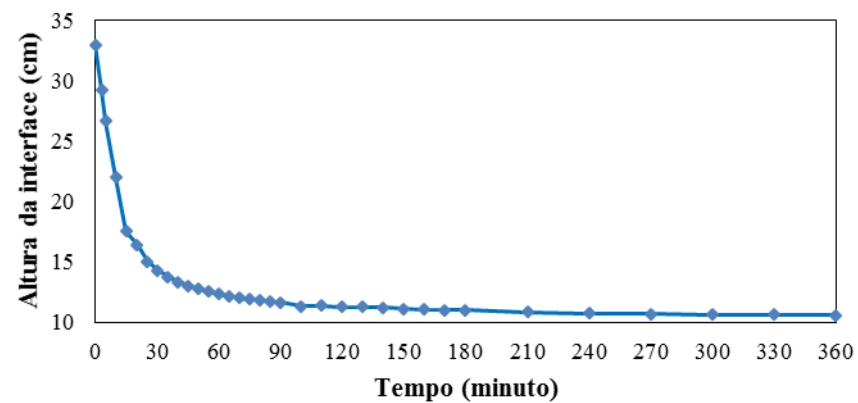
Curva Adensamento por Sedimentação
5,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



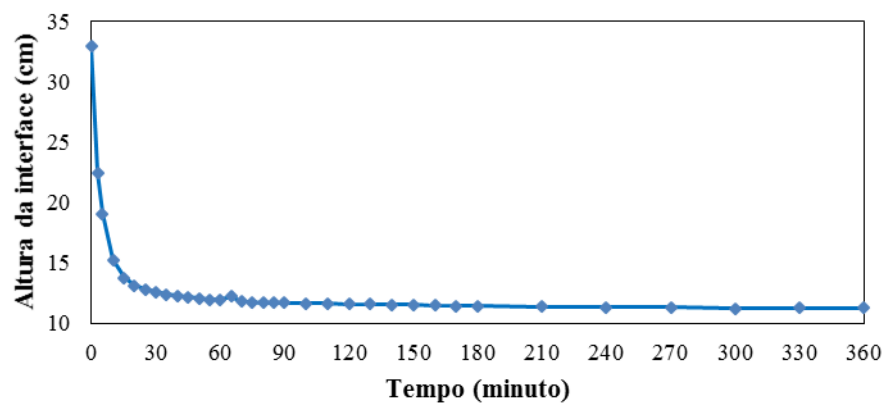
Curva Adensamento por Sedimentação
0,25 mg pol/g SST - Polímero Aniônico



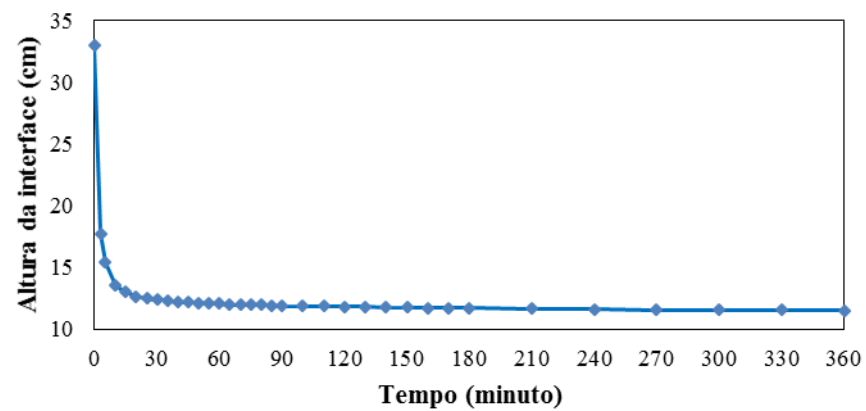
Curva Adensamento por Sedimentação
0,50 mg pol/g SST - Polímero Aniônico



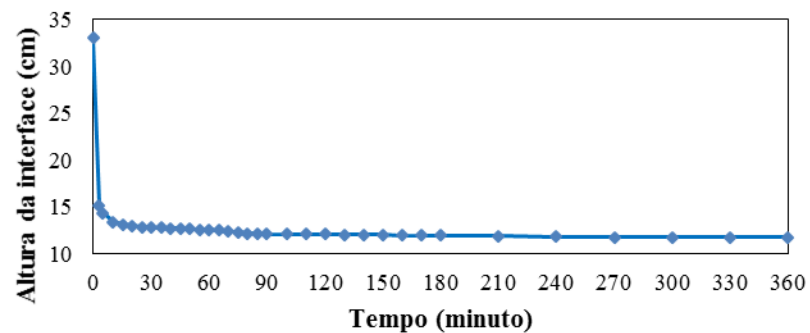
Curva Adensamento por Sedimentação
1,0 mg pol/g SST - Polímero Aniônico



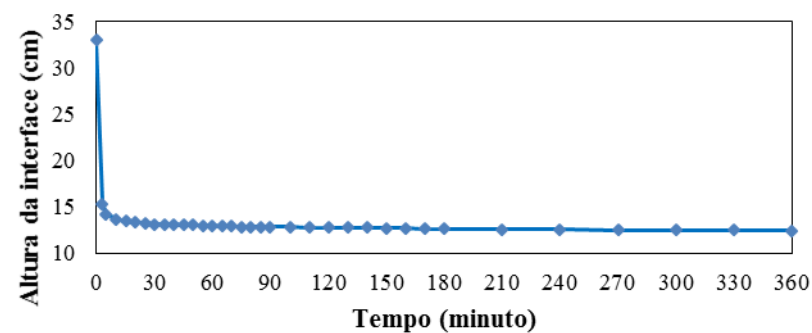
Curva Adensamento por Sedimentação
1,5 mg pol/g SST - Polímero Aniônico



Curva Adensamento por Sedimentação
2,0 mg pol/g SST - Polímero Aniônico

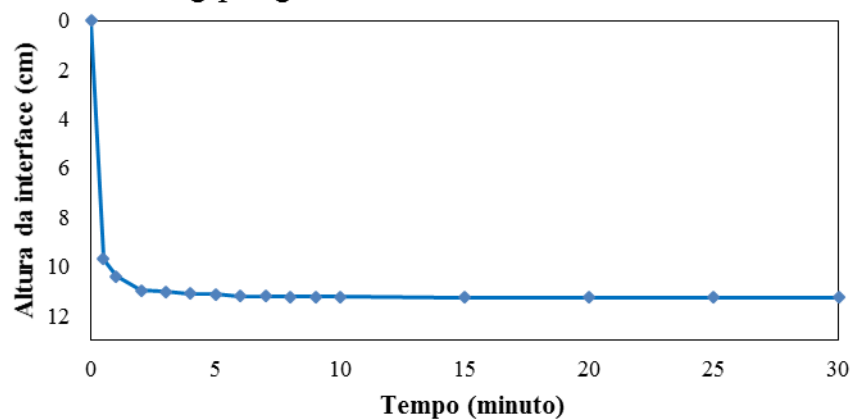


Curva Adensamento por Sedimentação
2,5 mg pol/g SST - Polímero Aniônico

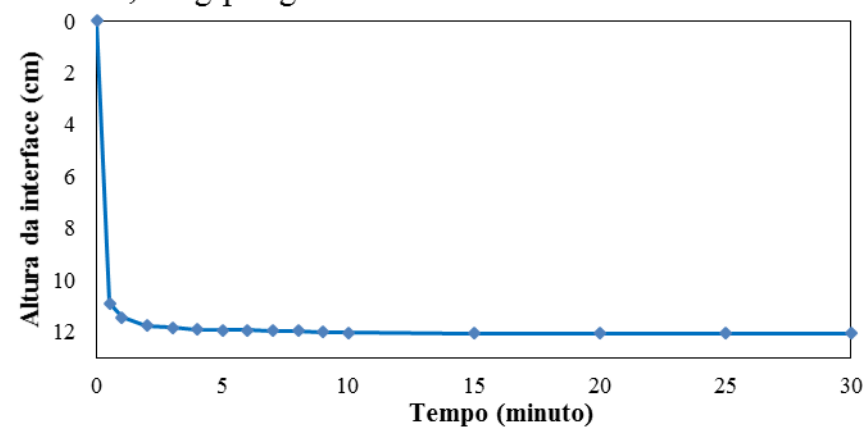


Curvas dos ensaios de adensamento por FAD para as diferentes dosagens do polímero catiônico – MB.

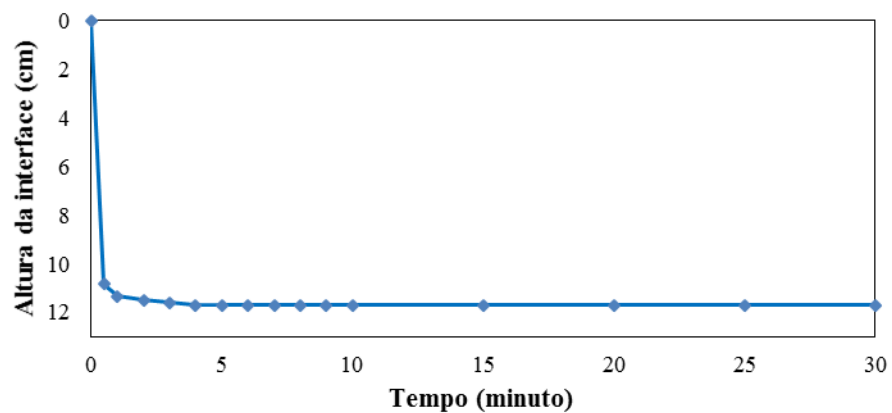
Curva Adensamento por Flotação 50%
3,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



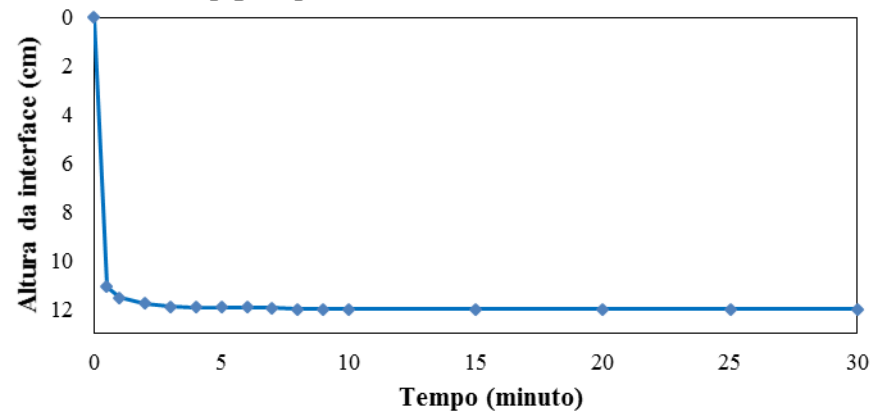
Curva Adensamento por Flotação 50%
4,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



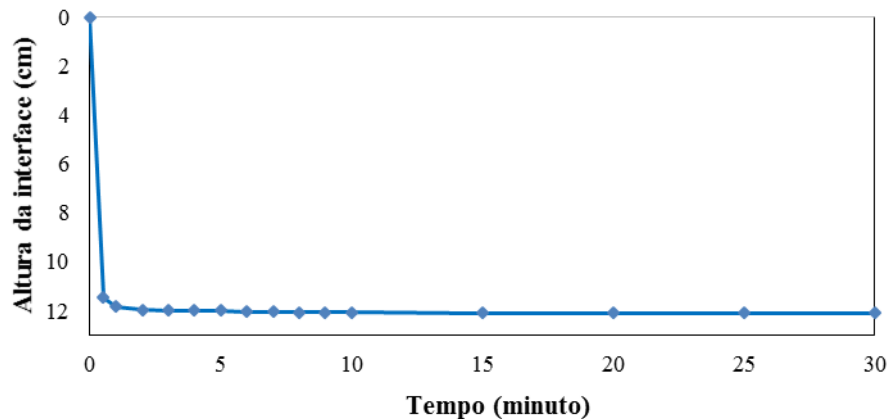
Curva Adensamento por Flotação 50%
4,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



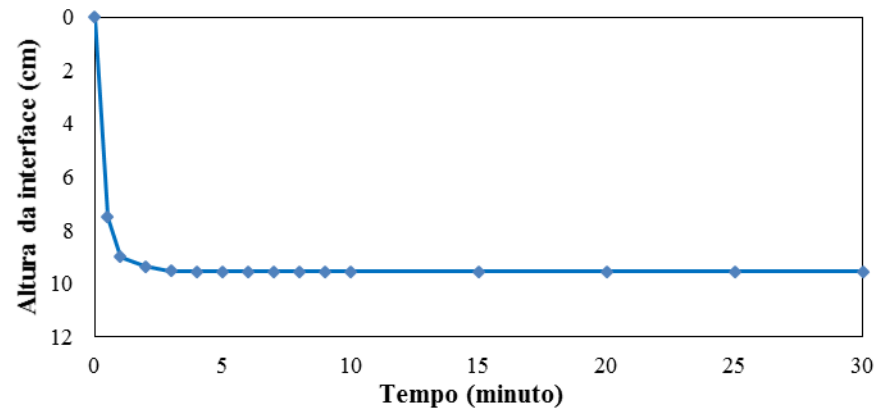
Curva Adensamento por Flotação 50%
5,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



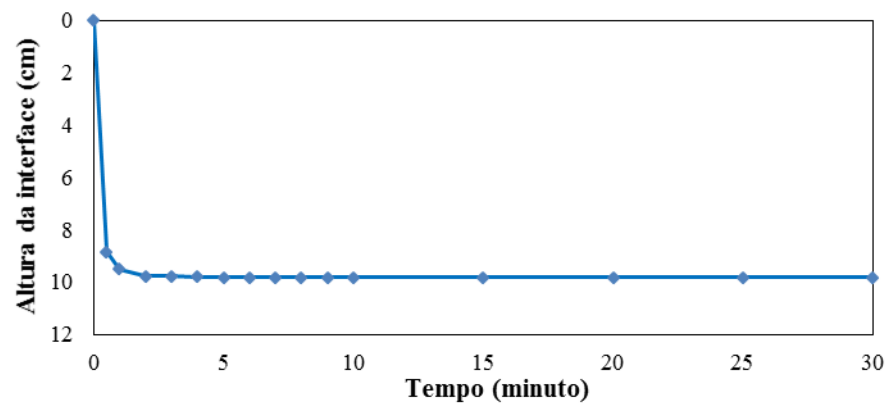
Curva Adensamento por Flotação 50%
5,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



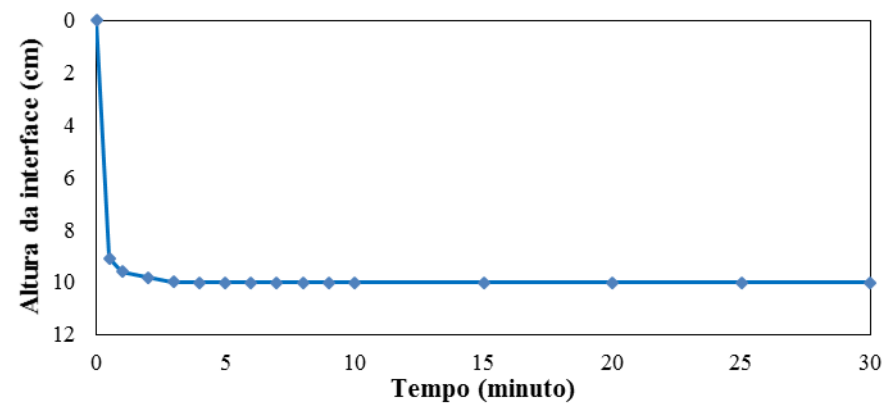
Curva Adensamento por Flotação 40%
3,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



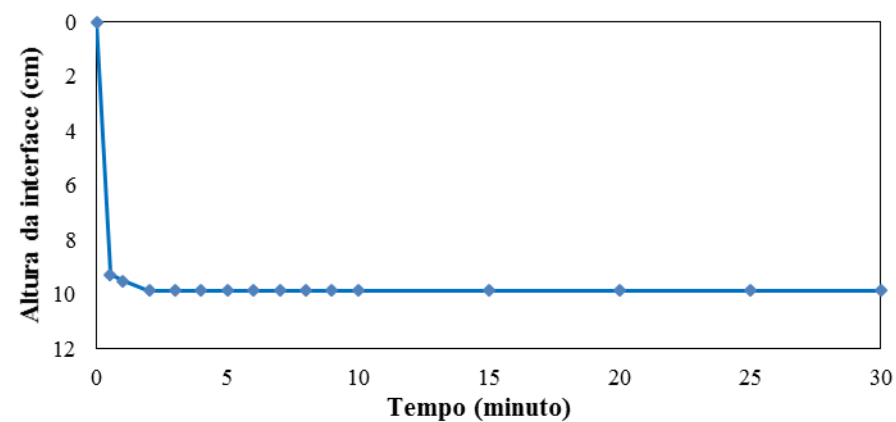
Curva Adensamento por Flotação 40%
4,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



Curva Adensamento por Flotação 40%
4,5 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



Curva Adensamento por Flotação 40%
5,0 mg pol/g SST - Polímero Catiônico MB



APÊNDICE E – VELOCIDADE DE CLARIFICAÇÃO (Vcl) NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ADENSAMENTO.

Velocidade de clarificação (Vcl) nos ensaios experimentais de adensamento por sedimentação e por FAD.

Adensamento	Tipo de Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	Vcl 1 (cm.min ⁻¹)	Vcl 2 (cm.min ⁻¹)	Vcl 3 (cm.min ⁻¹)	Média Vcl (cm.min ⁻¹)	Desvio Padrão
Sedimentação	Branco	0,0	1,13	1,16	0,94	1,08	0,09
	Catiônico MB	0,5	0,39	0,35	0,57	0,43	0,09
	Catiônico MB	1,0	0,41	0,66	0,44	0,50	0,10
	Catiônico MB	1,5	0,73	1,32	0,60	0,88	0,29
	Catiônico MB	2,0	2,06	1,10	0,94	1,37	0,46
	Catiônico MB	2,5	1,03	1,32	2,20	1,52	0,46
	Catiônico MB	3,0	3,30	2,20	1,50	2,33	0,64
	Catiônico MB	3,5	2,36	2,20	3,67	2,74	0,62
	Catiônico MB	4,0	6,60	5,50	5,32	5,81	0,53
	Catiônico MB	4,5	6,60	5,50	6,60	6,23	0,49
	Catiônico MB	5,0	6,73	6,47	6,60	6,60	0,09
	Catiônico MB	5,5	6,60	6,60	6,73	6,64	0,06
	Aniônico	0,25	0,97	1,22	1,38	1,19	0,15
	Aniônico	0,5	1,18	1,94	1,57	1,56	0,26
	Aniônico	1,0	1,94	3,30	2,54	2,59	0,47
	Aniônico	1,5	3,88	4,13	3,30	3,77	0,31
	Aniônico	2,0	5,50	5,08	4,71	5,10	0,27
	Aniônico	2,5	6,60	6,88	6,60	6,69	0,12
Flotação 50%	Catiônico MB	3,5	19,21	19,00	14,51	17,57	2,04
	Catiônico MB	4,0	20,67	19,52	16,71	18,97	1,50
	Catiônico MB	4,5	20,50	17,42	19,48	19,14	1,14
	Catiônico MB	5,0	20,33	18,31	19,05	19,23	0,73
	Catiônico MB	5,5	20,33	20,17	19,35	19,95	0,40
Flotação 40%	Catiônico MB	3,5	17,87	12,36	9,89	13,37	3,00
	Catiônico MB	4,0	15,78	14,41	12,71	14,30	1,06
	Catiônico MB	4,5	14,63	13,52	17,54	15,23	1,54
	Catiônico MB	5,0	15,00	16,61	16,89	16,17	0,78

APÊNDICE F – RESISTÊNCIA A FILTRAÇÃO (R) NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE ADENSAMENTO.

Resistência a filtração (R) nos ensaios experimentais de adensamento por sedimentação e por FAD.

Adensamento	Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	R (m.kg-1)
Sedimentação	Branco	0,0	74,0E+12
	Catiônico MB	0,5	45,1E+12
	Catiônico MB	1,0	41,0E+12
	Catiônico MB	1,5	40,1E+12
	Catiônico MB	2,0	37,8E+12
	Catiônico MB	2,5	40,8E+12
	Catiônico MB	3,0	42,6E+12
	Catiônico MB	3,5	16,9E+12
	Catiônico MB	4,0	15,8E+12
	Catiônico MB	4,5	11,9E+12
	Catiônico MB	5,0	9,0E+12
	Catiônico MB	5,5	10,3E+12
	Aniônico	0,25	67,4E+12
	Aniônico	0,5	59,2E+12
	Aniônico	1,0	46,5E+12
	Aniônico	1,5	21,6E+12
	Aniônico	2,0	17,0E+12
Aniônico	2,5	14,5E+12	
Flotação 50%	Branco	0,0	49,4E+12
	Catiônico MB	3,5	11,3E+12
	Catiônico MB	4,0	11,6E+12
	Catiônico MB	4,5	19,6E+12
	Catiônico MB	5,0	35,9E+12
	Catiônico MB	5,5	32,7E+12
Flotação 40%	Catiônico MB	0,0	71,5E+12
	Catiônico MB	3,5	12,9E+12
	Catiônico MB	4,0	10,9E+12
	Catiônico MB	4,5	12,9E+12
	Catiônico MB	5,0	14,3E+12

APÊNDICE G – TEOR DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (SST) E PORCENTAGEM DE SST EM RELAÇÃO A SSV E SSF.

Teor de sólidos em suspensão (SST) e porcentagem SST em relação a SSV e SSF no lodo adensado por sedimentação e por FAD para os tratamentos de lodo da primeira e segunda amostragem.

(continua)

Adensamento	Polímero	Dosagem (mg pol/g SST)	SST (%)	SSV (%SST)	SSF (%SST)
Sedimentação 1ª coleta	Branco	0	5,02	21,94	78,06
	Catiônico MB	1	5,08	23,35	76,65
	Catiônico MB	2	5,24	23,87	76,13
	Catiônico MB	3	5,24	23,51	76,49
	Catiônico MB	3,5	5,17	22,38	77,62
	Catiônico MB	4	5,15	22,22	77,78
	Catiônico MB	4,5	4,76	22,08	77,92
	Não-Iônico	0,5	5,19	19,85	80,15
	Não-Iônico	1	4,74	18,51	81,49
	Não-Iônico	1,5	4,68	22,69	77,31
	Não-Iônico	2	4,77	21,26	78,74
Flotação 1ª coleta	Branco 30%	0	3,33	22,69	77,31
	Branco 50%	0	3,57	27,06	72,94
	Branco 100%	0	3,85	22,76	77,24
Flotação 40% 1ª coleta	Catiônico MB	4,0	4,31	26,32	73,68
	Catiônico MB	4,5	4,63	24,45	75,55
	Catiônico MB	5,0	5,11	22,31	77,69
	Catiônico MB	5,5	3,86	23,72	76,28
Sedimentação 2ª coleta	Branco	0	6,77	22,70	77,30
	Catiônico MB	0,5	6,82	24,53	75,47
	Catiônico MB	1,0	6,98	25,45	74,55
	Catiônico MB	1,5	7,05	22,18	77,82
	Catiônico MB	2,0	6,63	22,29	77,71
	Catiônico MB	2,5	6,77	22,36	77,64
	Catiônico MB	3,0	6,57	21,39	78,61
	Catiônico MB	3,5	6,16	21,08	78,92
	Catiônico MB	4,0	6,11	22,88	77,12
	Catiônico MB	4,5	5,97	21,82	78,18
	Catiônico MB	5,0	5,59	21,74	78,26
	Catiônico MB	5,5	5,43	20,92	79,08
	Aniônico	0,25	6,79	21,05	78,95
	Aniônico	0,50	6,38	21,17	78,83
	Aniônico	1,0	6,23	22,24	77,76
Aniônico	1,5	6,14	23,92	76,08	

Teor de sólidos em suspensão (SST) e porcentagem SST em relação a SSV e SSF no lodo adensado por sedimentação e por FAD para os tratamentos de lodo da primeira e segunda amostragem.

(conclusão)

	Aniônico	2,0	5,96	22,62	77,38
	Aniônico	2,5	5,49	23,73	76,27
Flotação 50%	Catiônico MB	0,0	3,97	25,73	74,27
	Catiônico MB	3,5	5,51	24,67	75,33
	Catiônico MB	4,0	5,86	24,52	75,48
	Catiônico MB	4,5	5,56	22,97	77,03
	Catiônico MB	5,0	5,66	23,30	76,70
	Catiônico MB	5,5	5,81	21,06	78,94
Flotação 40%	Catiônico MB	0,0	3,46	23,15	76,86
	Catiônico MB	3,5	4,73	23,68	76,32
	Catiônico MB	4,0	4,72	22,74	77,26
	Catiônico MB	4,5	4,99	21,39	78,61
	Catiônico MB	5,0	5,31	22,38	77,62

ANEXO A –CLASSIFICAÇÃO DO LODO SEGUNDO A NBR 10.004 DE 2004 (ABNT 2004a).

Parâmetros analisados, limite de quantificação e métodos utilizados na classificação do lodo segundo a NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a).

(continua)

Parâmetros Analisados	Limite de Quantificação	Método
Resíduo Bruto		
Cor da Amostra	Visual	Visual
Estado Físico	Visual	Visual
Líquidos Livres (ac)	1,00mL/100g	ABNT NBR 12988:1993
Inflamabilidade (ac)	A-	-
pH 1:1 (ac)	0,010UpH	NBR 10004:2004
Teor de Sólidos Secos (ac)	0,100%	ABNT NBR 10004:2004
Umidade (ac)	0,100%	ABNT NBR 6457:1986
Óleos e Graxas (ac)	0,100%	SMEWW 22ª ed., 2012 - 5520 E
Sulfeto (ac)	1,00mg/kg	-
Cianeto (ac)	1,00mg/kg	EPA 9013A 11/2004
Fenol (ac)	3,00mg/kg	-
Extrato Lixiviado		
pH Final do Extrato Lixiviado	0,010UpH	ABNT NBR 10005:2004
Arsênio (As) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Bário (Ba) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Cádmio (Cd) Total (ac)	0,001mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Chumbo (Pb) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Cromo (Cr) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Fluoreto (ac)	0,100mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Mercúrio (Hg) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Prata (Ag) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Selênio (Se) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Extrato Solubilizado		
Alumínio (Al) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Arsênio (As) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Bário (Ba) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22ª ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C

Parâmetros analisados, limite de quantificação e métodos utilizados na caracterização do lodo segundo a NBR 10.004 de 2004 (ABNT 2004a).

(conclusão)

Cádmio (Cd) Total (ac)	0,001mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Chumbo (Pb) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Cianeto Total (ac)	0,050mg/L	Hach - 8027 7 ^a ed.
Cloreto (ac)	5,00mg/L	SMEWW 22 ^a ed., 2012 - 4500 B
Cobre (Cu) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Cromo (Cr) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Ferro (Fe) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Fluoreto (ac)	0,100mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Manganês (Mn) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Mercúrio (Hg) Total (ac)	0,0001mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Nitrogênio Nitrato(ac)	1,00mg/L	Hach - 8039 7 ^a ed.
Prata (Ag) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Selênio (Se) Total (ac)	0,005mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Sódio (Na) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Sulfato (ac)	10,0mg/L	Hach - 8051 7 ^a ed
Surfactantes (ac)	0,100mg/L	SMEWW 22 ^a ed., 2012 - 5540 C
Zinco (Zn) Total (ac)	0,025mg/L	SM 22 ^a ed, 2012- 3120B / SW 846 rev.3, 2007- 6010C
Fenol (ac)	0,00002mg/L	EPA 8270D 02/2007

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas; **(ac):** Ensaio acreditado de acordo com norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005; **SMEWW:** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22^a ed., 2012; **EPA:** Environmental Protection Agency. **Hach:**Hach Test Method.