

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

APLICAÇÃO DA COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E
SEDIMENTAÇÃO COMO PÓS-TRATAMENTO DE
EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE PAPEL E
CELULOSE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JÓICE CRISTINI KURITZA

IRATI-PR
2012

JÓICE CRISTINI KURITZA

APLICAÇÃO DA COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO
COMO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE
PAPEL E CELULOSE

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Jeanette Beber de Souza

Orientadora

Dr. Sérgio Martinelli

Co-Orientador

Prof. Dr. Carlos Magno Souza Vidal

Co-Orientador

IRATI-PR
2012

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

K97a KURITZA, Joice Cristini.
Aplicação da coagulação, floculação e sedimentação como pós-
tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose / Joice
Cristini Kuritza. – Irati, PR : UNICENTRO, 2012.

109f.

ISBN

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-
Oeste, PR. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais,
área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos
Florestais.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Jeanette Beber de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Martinelli

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Magno Souza Vidal

1. Engenharia Florestal – dissertação. 2. Tecnologia – papel –
celulose. I. Souza, Jeanette Beber de. II. Martinelli, Sérgio.
III. Vidal, Carlos Magno Souza. IV. Título.

CDD 20^a ed. 676



Universidade Estadual do Centro-Oeste

Reconhecida pelo Decreto Estadual nº 3.444, de 8 de agosto de 1997

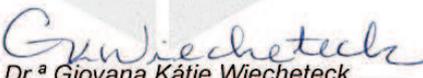
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

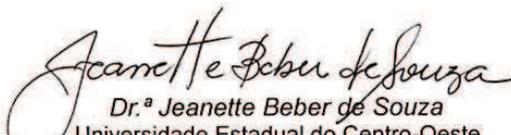
Defesa Nº 33

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Jóice Cristini Kuritza** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "Aplicação da coagulação, floculação e sedimentação como pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 15 de março de 2012.


Dr.^a Giovana Kátie Wiecheteck
Universidade Estadual de Ponta Grossa
Primeira Examinadora


Dr. Marcelo Real Prado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Segundo Examinador


Dr.^a Jeanette Beber de Souza
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientadora e Presidente da Banca Examinadora

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Dedico aos meus pais, Jairo e Eliane como pequena retribuição pelo amor puro e incondicional que sempre dedicaram a mim, em toda minha vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por ter me dado saúde, inteligência e discernimento. Por iluminar meus caminhos e me dar força para percorrê-los.

Aos amados pais, Jairo e Eliane, por terem sido os primeiros a acreditar que eu era capaz, por terem me ensinado tudo que é importante saber e por todo apoio e amor concedidos sempre.

Aos meus irmãos Agair e Marilize e seus filhos, meus amados sobrinhos, Nicolas, Nathan, Gabriely, Marina, Felipe e Sofia por alegrarem a minha vida e me encherem de esperança naqueles momentos em que tudo parece ir de mal a pior.

Aos professores Jeanette Beber de Souza e Carlos Magno de Sousa Vidal pela orientação no mestrado, por todas as ideias e contribuições para esse trabalho, pelo imenso carinho, paciência e simpatia em todas as vezes que precisei de ajuda, além de terem me inspirado, desde a graduação, para optar pela carreira acadêmica.

À minha família iratiense, todas as meninas que foram minhas irmãs na Casa Rosa, e principalmente à Dona Elizabeth Beraldo. Por toda atenção, cuidado e carinho nesses 6 anos morando em Irati.

Especialmente agradeço ao Diego Gasparetto, por ter ouvido minhas lamúrias com amável atenção e “atrapalhado” de uma forma única e maravilhosa sempre que precisei de distração.

Às minhas mestras preferidas, Larissa Quartaroli e Heloísa Rancatti, que deixaram muitas “digitais” nesse trabalho. Agradeço por toda amizade e companheirismo e principalmente por terem se tornado minhas irmãs do coração.

As minhas amigas Letícia, Dariana, Débora, Bárbara, Caciane, Ludmila, Laís e Nádia. Por terem sido minha equipe de apoio, aquelas que nunca questionaram e estiveram sempre na torcida.

Àqueles que tornaram os dias na sala de estudos mais leves e agradáveis, os colegas de mestrado: Ângelo, Aurélio, Gustavo, Maílson, Marilu e Rodrigo.

Aos colegas de trabalho do laboratório de saneamento da UNICENTRO, principalmente à MSc. Grasielle Soares Cavallini por todo conhecimento compartilhado e também ao aluno Frederico José Krüger, por toda ajuda.

Aos professores do programa de mestrado em ciências florestais, à secretaria em nome da secretária Nilce Flávia Bühler dos Santos e à coordenação em nome do professor Eduardo Silva Lopes.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Esse trabalho só foi possível graças a vocês, aceitem meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Lista de símbolos e abreviaturas.....	xiii
Resumo	xv
Abstract.....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	4
3. Referencial Teórico.....	5
3.1 A Indústria de papel e celulose	5
3.2 Impactos Ambientais associados à indústria de papel e celulose	7
3.3 Tratamento do efluente da indústria de celulose e papel	9
3.3.1 Coagulação, floculação e sedimentação	11
3.3.2 Membranas filtrantes	16
4. Materiais e Métodos	20
4.1 Caracterização do efluente.....	20
4.2 Etapas da pesquisa	21
4.2.1 Primeira etapa: ensaios preliminares de coagulação	24
4.2.1.1 Ensaio 01: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante, sem adição de polímero e com variação do gradiente de velocidade de mistura lenta	24
4.2.1.2 Ensaio 02: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante e testando três polímeros como auxiliares de floculação	25
4.2.1.3 Ensaio 03: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico como auxiliar de floculação	26
4.2.2 Segunda etapa: ensaios principais de coagulação.....	27
4.2.3 Terceira etapa: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação e ensaio de microfiltração.....	28
4.2.3.1 Caracterização da unidade de microfiltração tangencial	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Resultados da primeira etapa: ensaios preliminares de coagulação/floculação/sedimentação.....	33
5.1.1 Caracterização do efluente da primeira etapa.....	33
5.1.2 Ensaio 01: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante, sem adição de polímero e com variação do gradiente de velocidade de mistura lenta.....	34
5.1.3 Ensaio 02: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e testando três polímeros como auxiliares de floculação.....	37
5.1.3.1 Ensaio 02a: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico PRAESTOL 2540 como auxiliar de floculação	38
5.1.3.2 Ensaio 02b: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação	40
5.1.3.3 Ensaio 02c: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando	

PAC como coagulante e polímero PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação	42
5.1.3.4 Escolha do melhor polímero	43
5.1.4 Ensaio 03: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico como auxiliar de floculação	44
5.2 Resultados da segunda etapa: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação	48
5.2.1 Resultados da primeira fase: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação, utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens do polímero aniônico como auxiliar de floculação	48
5.2.1.1 Caracterização do efluente da primeira fase da segunda etapa	48
5.2.1.2 Ensaio 04: ensaio de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens do polímero aniônico como auxiliar de floculação	49
5.2.1.3 Produção e características de sedimentabilidade do lodo	56
5.2.1.4 Ensaio 05: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens de polímero aniônico como auxiliar de floculação	58
5.2.1.5 Produção e características de sedimentabilidade do lodo	66
5.2.1.6 Ensaio 06: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens de polímero aniônico como auxiliar de floculação	67
5.2.1.7 Produção e características de sedimentabilidade do lodo	74
5.2.2 Resultados da segunda fase: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação, utilizando as melhores dosagens de PAC e polímero aniônico e variando os tempos de mistura lenta	75
5.2.2.1 Caracterização do efluente utilizado na segunda fase na segunda etapa	75
5.2.2.2 Ensaio 07: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando PAC como coagulante, polímero aniônico como auxiliar de floculação e menores tempos de floculação	76
5.2.2.3 Ensaio 08: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando PAC como coagulante, polímero aniônico como auxiliar de floculação e menores tempos de floculação	81
5.3 Resultados da terceira etapa: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação e ensaio de microfiltração	87
5.3.1 Ensaio 09: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação para definir a melhor dosagem de polímero e avaliar a remoção de AOX e lignina	87
5.3.1.1 Caracterização do efluente usado no ensaio 09	88
5.3.1.2 Resultados do ensaio 09: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação para definir a melhor dosagem de polímero e avaliar a remoção de AOX e lignina	89
5.3.2 Ensaio 10: ensaio de microfiltração	92
5.3.2.1 Caracterização do efluente usado no ensaio 10	92
5.3.2.2 Resultados do ensaio 10: ensaio de microfiltração	93
6. Conclusões e Recomendações	101
7. Referências Bibliográficas	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Poluentes dos vários estágios do processo de fabricação do papel.....	09
Figura 3.2 – Aglomeração de partículas pelo polímero dando origem aos grandes flocos.....	15
Figura 3.3 – Esquema de definição do processo por membrana.....	17
Figura 4.1 – Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes da indústria de papel e celulose cujo efluente foi estudado nesta pesquisa.....	21
Figura 4.2 – Fotografia do <i>jar-test</i> utilizado na pesquisa.....	22
Figura 4.3 – Fluxograma dos ensaios da etapa 01.....	26
Figura 4.4 – Fluxograma dos ensaios da primeira e segunda fase da etapa 02.....	28
Figura 4.5 – Fluxograma dos ensaios da etapa 03.....	31
Figura 4.6 – Desenho esquemático do equipamento piloto utilizado nos experimentos de microfiltração.....	31
Figura 4.7 – Fotografia do equipamento piloto utilizado nos experimentos de microfiltração: (A) vista frontal e (B) vista lateral.....	32
Figura 5.1: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos nos jarros numerados de 01 a 04.....	35
Figura 5.2: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos nos jarros numerados de 05 a 08.....	35
Figura 5.3: Resultados das eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 01.....	36
Figura 5.4: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 01, variando o gradiente de velocidade da mistura lenta.....	37
Figura 5.5: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos no ensaio 02a.....	39
Figura 5.6: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 02a.....	39
Figura 5.7: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 02b.....	40
Figura 5.8: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 02b.....	41
Figura 5.9: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 02c.....	42
Figura 5.10: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio	

02c.....	43
Figura 5.11: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, utilizando 150mg/L de PAC, variando os tipos e as dosagens de polímero empregado.....	44
Figura 5.12: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 03.....	45
Figura 5.13: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 03.....	45
Figura 5.14: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 03.....	46
Figura 5.15: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 03.....	47
Figura 5.16: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO obtidas no jarro número 08 do ensaio 03.....	47
Figura 5.17: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 04.....	51
Figura 5.18: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 04.....	51
Figura 5.19: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 04.....	52
Figura 5.20: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 04.....	52
Figura 5.21: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 04.....	53
Figura 5.22: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 04.....	54
Figura 5.23: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 04.....	54
Figura 5.24: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 04.....	55
Figura 5.25: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 04.....	57
Figura 5.26: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 05.....	60
Figura 5.27: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 05.....	60
Figura 5.28: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 05.....	61
Figura 5.29: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 05.....	61
Figura 5.30: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 05.....	62
Figura 5.31: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 05.....	63
Figura 5.32: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 05.....	63
Figura 5.33: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 05.....	65
Figura 5.34: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 05.....	66
Figura 5.35: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 06.....	69
Figura 5.36: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 06.....	69
Figura 5.37: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 06.....	70
Figura 5.38: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 06.....	70

Figura 5.39: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 06.....	71
Figura 5.40: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 06.....	72
Figura 5.41: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 06.....	72
Figura 5.42: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 06.....	73
Figura 5.43: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 06.....	74
Figura 5.44: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 07a.....	77
Figura 5.45: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 07b.....	78
Figura 5.46: Resultados das remoções de turbidez obtidas nos ensaios 07a e 07b.....	79
Figura 5.47: Resultados das remoções de cor aparente obtidas nos ensaios 07a e 07b.....	79
Figura 5.48: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas nos ensaios 07a e 07b.....	80
Figura 5.49: Resultados das remoções de DQO obtidas nos ensaios 07a e 07b.....	80
Figura 5.50: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 08a.....	82
Figura 5.51: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 08b.....	83
Figura 5.52: Resultados das remoções de turbidez obtidas nos ensaios 08a e 08b.....	84
Figura 5.53: Resultados das remoções de cor aparente obtidas nos ensaios 08a e 08b.....	85
Figura 5.54: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas nos ensaios 08a e 08b.....	85
Figura 5.55: Resultados das remoções de DQO obtidas nos ensaios 08a e 08b.....	86
Figura 5.56: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira, DQO, AOX e lignina, obtido no ensaio 09.....	90
Figura 5.57: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, AOX e lignina, obtidas no ensaio 09.....	90
Figura 5.58: Fluxo do permeado durante a operação na unidade piloto de microfiltração tangencial.....	96
Figura 5.59: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina, obtidas na microfiltração do efluente bruto, no ensaio 10.....	97
Figura 5.60: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina, obtidas pelo conjunto coagulação/floculação/sedimentação conjugado à microfiltração, no ensaio 10.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química aproximada dos diferentes constituintes da madeira de coníferas e folhosas.....	06
Tabela 4.1 Métodos utilizados para as análises físico-químicas.....	22
Tabela 5.1: Caracterização do efluente nos ensaios da primeira etapa.....	34
Tabela 5.2: Configurações do ensaio 01 e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	35
Tabela 5.3: Configurações do ensaio 02a e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	38
Tabela 5.4: Configurações do ensaio 02b e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	40
Tabela 5.5: Configurações do ensaio 02c e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	42
Tabela 5.6: Configurações do ensaio 03 e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	45
Tabela 5.7: Caracterização do efluente nos ensaios da segunda etapa.....	49
Tabela 5.8: Configurações do ensaio 04 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	50
Tabela 5.9: Faixa e valores típicos de IVL para as cinco faixas de sedimentabilidade.....	57
Tabela 5.10: Configurações do ensaio 05 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	59
Tabela 5.11: Configurações do ensaio 06 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	68
Tabela 5.12: Caracterização do efluente nos ensaios da segunda fase da segunda etapa.....	76
Tabela 5.13: Configurações do ensaio 07a e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	77
Tabela 5.14: Configurações do ensaio 07b e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	78
Tabela 5.15: Configurações do ensaio 08a e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	82
Tabela 5.16: Configurações do ensaio 07b e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	83
Tabela 5.17: Caracterização dos efluentes utilizados no ensaio 09.....	89

Tabela 5.18: Configurações do ensaio 09 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, AOX e lignina após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	90
Tabela 5.19: Caracterização dos efluentes utilizados no ensaio 10.....	92
Tabela 5.20: Resultados das análises realizadas no efluente coletado após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação.....	93
Tabela 5.21: Características da operação com água destilada na unidade piloto de microfiltração.....	94
Tabela 5.22: Características da operação com efluente que recebeu pré-tratamento na unidade piloto de microfiltração.....	95
Tabela 5.23: Características da operação com efluente sem pré-tratamento na unidade piloto de microfiltração.....	95
Tabela 5.24: Residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO e resultados das demais análises após tratamento por microfiltração do efluente sem pré-tratamento.....	97
Tabela 5.25: Resultados das análises realizadas na amostra composta após tratamento por microfiltração do efluente sem pré-tratamento.....	97
Tabela 5.26: Residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO e resultados das demais análises após tratamento por microfiltração do efluente previamente tratado.....	98
Tabela 5.27: Resultados das análises realizadas na amostra composta após tratamento por microfiltração do efluente previamente tratado.....	98
Tabela 5.28: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius, unidade de temperatura;

µm – Micrometro, unidade de medida de comprimento;

µS – MicroSiemens, medida de contundência elétrica;

ΔP - Perda de carga;

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas;

Al_n(OH)_mCl_{3n-m} – Fórmula química do policloreto de alumínio;

AOX – Composto orgânico halogenado;

APHA – American Public Heath Association;

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel;

cm – centímetro, unidade de comprimento;

COT – carbono orgânico total;

DBO – Demanda biológica de oxigênio;

DC – Dosagem de coagulante;

DP – Dosagem de polímero;

DQO – Demanda química de oxigênio;

ECF – Elementary chlorine free;

ETE – Estação de tratamento de esgoto;

g – Grama, unidade de medida de massa;

Gc–Gradiente de mistura rápida;

Gf – gradiente médio de mistura lenta;

h – altura da camada de lodo formada no fundo da proveta;

IVL – índice de volume de lodo;

m³ – Metro cúbico, unidade de medida de volume;

MBBR - Moving Bed Bio Reactor

mg – Miligrama, unidade de medida de massa;

mL – mililitro, unidade de medida de volume;

MPa – Megapascal, unidade de medida de pressão;

nm – Nanômetro, unidade de medida de comprimento;

NTK - Nitrogênio Kjeldahl Total;

OD – Oxigênio dissolvido;

PAC – Cloreto de polialumínio

pH – Potencial hidrogeniônico;
PVC – Policloreto de vinila;
Tf – Tempo de floculação;
Tc – Tempo de mistura rápida;
Ts – tempo de sedimentação
t_{sa} – tonelada de celulose seca ao ar (-5% de umidade);
ton – Toneladas, unidade de medida de massa;
s – segundos, unidade de medida de tempo;
SS – Sólidos suspensos;
SST – Sólidos suspensos totais;
ST – Sólidos Totais;
u_C – Unidade de cor, unidade de medida de cor;
u_T – Unidade de turbidez, unidade de medida de turbidez;
V_s – velocidade de sedimentação

RESUMO

Jóice Cristini Kuritza. Aplicação da coagulação/precipitação como pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o emprego do conjunto coagulação/floculação/sedimentação no pós-tratamento do efluente de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel e celulose. Foram realizados testes em laboratório, em equipamento de bancada do tipo *jar-test*, para estabelecer as melhores configurações operacionais do tratamento empregado. Os testes foram divididos em três etapas: o objetivo da primeira etapa foi verificar a eficiência do tratamento com aplicação individual de coagulante (PAC – cloreto de polialumínio), definir os parâmetros operacionais de mistura lenta e de sedimentação, escolher o polímero a ser usado como auxiliar de floculação além de obter uma primeira indicação das melhores dosagens de coagulante e polímero. Na etapa 02 foram realizados mais testes de coagulação/floculação/sedimentação testando ampla faixa de dosagens de coagulante combinada com diferentes dosagens de polímero aniônico. Além disso, foram testados tempos menores de floculação. O êxito do tratamento foi medido em função da remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO, além da análise de IVL – índice de volume de lodo. Na etapa 03 foram feitos dois ensaios, um de coagulação/floculação/sedimentação para definir a melhor dosagem de polímero e verificar principalmente se o tratamento era eficiente na remoção de lignina e AOX, e um ensaio de microfiltração, em uma unidade piloto, para avaliar o desempenho do sistema quando submetido a efluente tratado na melhor configuração de coagulação/floculação/sedimentação encontrada. Os resultados indicaram que a coagulação/floculação/sedimentação melhorou as características do efluente, com redução de até 98% de turbidez, 95% de cor aparente, 93% de cor verdadeira e 75% de DQO, utilizando dosagem de PAC de 250mg/L e 1mg/L de polímero aniônico. Em valores residuais, a turbidez foi reduzida a 1,86uT, a cor aparente a 92uC, a cor verdadeira a 79uC e a DQO a 78mg/L. Além disso, houve remoção de 60% dos AOX e 70% de lignina. O lodo gerado pelo tratamento com polímero apresentou melhores condições de sedimentabilidade, ao contrário das configurações em que foi utilizado somente coagulante. No emprego do efluente tratado por coagulação/floculação/sedimentação na unidade piloto de microfiltração, houve melhoria significativa no fluxo de permeado em relação ao fluxo de permeado da filtração do efluente sem pré-tratamento. Sendo assim, o tratamento empregado apresentou grande potencialidade de aplicação como pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose e também como pré-tratamento de efluentes de membranas de microfiltração.

Palavras chave: coagulação, polímero aniônico, indústria de papel e celulose.

ABSTRACT

Jóice Cristini Kuritza. Application of coagulation / precipitation as a post-treatment of effluent from a pulp and paper industry.

The purpose of this study was to evaluate the use of the coagulation / flocculation / sedimentation set in the post-treatment of effluent from a treatment station from a pulp and paper mill. Tests were performed in laboratory utilizing *jar-test* instruments to establish the best operational settings for the treatment used. The tests were divided in three steps: the purpose of the first step was to verify the treatment efficiency with individual application of coagulant (PAC - aluminum polychloride), set the operational parameters of slow mixing and sedimentation, choose the polymer to be used as an auxiliary of flocculation and to obtain a first indication of the best dosages of coagulant and polymer. In stage 02 were performed more tests of coagulation / flocculation / sedimentation testing a large range of doses of coagulation combined with different dosages of anionic polymer. Moreover, were tested shorter times of flocculation. The success of treatment was measured by removing turbidity, color apparent and true and COD and true, besides analysis of SVI - sludge volume index. In step 03 were made two tests, a coagulation / flocculation / sedimentation to define the best dosage of polymer and especially verify whether the treatment was effective at removing lignin and AOX, and an assay of microfiltration, on a pilot plant, to evaluate the system performance when applied treated effluent in the best configuration found of coagulation / flocculation / sedimentation. The results indicated that coagulation / flocculation / sedimentation has improved characteristics of the effluent, reducing turbidity up to 98%, 95% in apparent color, 93% of true color and 75% of COD using PAC dosage of 250 mg / L and 1mg / L of anionic polymer. In residual values, turbidity was reduced to 1.86 uT, the apparent color to 92uC, the true color to 79uC and COD to 78mg / L. Furthermore, there was 60% removal of AOX and 70% of lignin. The sludge generated by treatment with polymer had better sedimentability compared to the configurations in which only coagulant was used. In the use of the treated effluent by coagulation / flocculation / sedimentation in the pilot plant of microfiltration, there was significant improvement in the permeate flux in relation to the permeate flux filtration of the effluent without prior treatment. Therefore, the treatment used presented great potential for application as post-treatment of effluent from pulp and paper mill and as a pre-treating effluents from microfiltration membranes.

Key-words: coagulation, anionic polymer, pulp and paper mill

1. INTRODUÇÃO

As indústrias de base florestal tem grande importância no cenário econômico e comercial brasileiro. Segundo a ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (2010) o Brasil contava com mais de 6,5 milhões de hectares de florestas plantadas com pinus e eucalipto em 2010, sendo o estado do Paraná o terceiro colocado em área plantada, atrás apenas de Minas Gerais e São Paulo. Dentre todos os produtos advindos da produção florestal, os produtos derivados da celulose possuem alto grau de agregação de valor ao produto madeireiro, além de chegar muito próximo das necessidades específicas do consumidor por meio da produção dos diversos tipos de papel para impressão, papéis cartão, papelões ondulados para embalagens, entre outros. Esses produtos são destinados ao mercado interno e externo, movimentando a economia nacional e gerando milhares de empregos.

Em contrapartida aos grandes ganhos econômicos provenientes das indústrias de papel e celulose estão os grandes impactos gerados por essas indústrias em todas as etapas da produção, desde a colheita da madeira e o seu processamento, a polpação e o branqueamento da polpa até o transporte do produto final ao consumidor. As indústrias de papel e celulose estão entre as que utilizam maior vazão de água durante seu processo produtivo. Segundo Thompson (2001) o consumo de água pode chegar a 60m³/t_{sa} – tonelada de celulose seca ao ar, e esse volume de água consumido está diretamente ligado ao volume de efluentes que serão gerados ao longo do processo e que deverão receber tratamento previamente ao seu lançamento nos corpos receptores.

As características das águas residuárias resultantes dessa produção variam de acordo com o processo utilizado na polpação, do tipo de papel que está sendo produzido, da madeira utilizada, dos processos tecnológicos empregados, das práticas de gestão da empresa, da recirculação interna de efluentes e do volume de água utilizado em toda a indústria (Pokhrel e Viraraghavan, 2004). No entanto, algumas características, como o elevado teor de matéria orgânica, que acarreta em elevados valores de DBO e DQO, estão sempre presentes. Isso deve-se ao fato da madeira apresentar uma fração representativa de constituintes orgânicos em sua composição. Esses compostos são processados durante a polpação e conferem essa característica ao efluente. Além disso, durante toda a fabricação da polpa e do papel, são utilizados diversos reagentes químicos, que vão dar características específicas ao efluente. Nesse sentido, o tipo de tratamento empregado deve ser pensado de modo particular em cada indústria, para que se alcance a eficiência exigida pela lei vigente, além de, em alguns casos, permitir a reutilização dos reagentes e da água.

A maioria das indústrias contempla tratamento somente até o nível secundário e nesses casos existem as etapas de tratamento preliminar e primário, usualmente empregando tecnologias de tratamento físico como grades e decantadores e o tratamento secundário, usualmente representado por alguma tecnologia de tratamento biológico. Nesses casos é comum o emprego de lagoas aeradas, lodos ativados ou reatores anaeróbios que são eficientes na remoção de matéria orgânica biodegradável. Os tratamentos físicos como decantadores, podem ser dispostos anterior ou posteriormente ao tratamento biológico, completando e melhorando com isso a qualidade do efluente final. Algumas indústrias apresentam efluentes com características químicas que podem prejudicar o tratamento biológico, sendo incluídas então etapas complementares de tratamento químico como correção do pH ou adição de oxigênio dissolvido, visando com isso favorecer e/ou estimular os microrganismos responsáveis pela degradação do efluente na etapa biológica.

Com a associação de todas as etapas de tratamento, busca-se um efluente que esteja adequado com a legislação vigente em termos de contaminação dos corpos receptores e do solo. As indústrias que buscam um tratamento em nível terciário do efluente devem optar por tecnologias complementares com intuito de melhorar ainda mais a qualidade final do efluente. Nesses casos, são indicados processos físicos e químicos como a adsorção, a flotação, a oxidação e a precipitação química, além dos processos de separação por membranas.

O conjunto coagulação/floculação/sedimentação é indicado como alternativa de tratamento terciário para remoção complementar de matéria orgânica não biodegradável, de compostos orgânicos halogenados (AOX), cor residual entre outros contaminantes principalmente aqueles que se apresentam dissolvidos, na fração coloidal da água (GANJIDOUST et al, 1997).

Em uma acepção abrangente, a coagulação é a alteração físico-química dessas partículas coloidais, produzindo partículas que possam formar flocos e serem removidas em seguida em um processo físico de separação, usualmente a sedimentação (RICHTER, 2009). Essa desestabilização das partículas é normalmente alcançada pela adição de sais de alumínio e ferro, denominados de coagulante, que podem ser utilizados individualmente ou combinados com algum polieletrólito auxiliar de floculação, de origem sintética ou natural.

As plantas de tratamento que contemplam tecnologias de tratamento em nível terciário apresentam, em geral, efluente final de ótima qualidade, sendo possível, em alguns casos, a alternativa de recirculação ou reúso desse efluente.

O processo de separação por membranas se inclui nesse contexto como uma alternativa tecnológica atrativa às indústrias de celulose e papel. As membranas são barreiras

físicas capazes de remover matéria orgânica, material particulado, turbidez, cor, entre outros, tornando essa tecnologia aplicável para os casos em que se deseja um efluente com alta qualidade final.

Apesar dos benefícios supracitados da tecnologia, alguns problemas podem ocorrer durante sua utilização. O principal deles é a colmatação (entupimento das membranas) que diminui o fluxo de operação, gerando custos com a limpeza e substituição da membrana, podendo ocasionar a paralisação da operação. Para diminuir esse problema é essencial que o afluente à membrana tenha pouca quantidade de sólidos suspensos e dissolvidos que conferem turbidez e cor, que causam o entupimento dos poros das membranas, nesse sentido, o conjunto coagulação/floculação/sedimentação é indicado como alternativa de pré-tratamento do efluente com vistas à minimização da colmatação das membranas.

O objetivo da presente pesquisa foi avaliar o emprego da coagulação/floculação/sedimentação como pós-tratamento do efluente de uma indústria integrada de celulose e papel e como pré-tratamento do efluente em membrana de microfiltração.

2. OBJETIVOS

Essa pesquisa teve como objetivo principal a avaliação do emprego da coagulação/floculação/sedimentação no pós-tratamento do efluente de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel e celulose.

Especificamente, objetivou-se:

- a) estudar os aspectos operacionais para emprego da coagulação/floculação/sedimentação no pós-tratamento do efluente e estabelecer as melhores condições da tecnologia para o caso em estudo;
- b) avaliar o efeito do coagulante utilizado individualmente e combinado com polímero aniônico no desempenho do conjunto coagulação/floculação/sedimentação;
- c) avaliar a coagulação/floculação/sedimentação como alternativa de pré-tratamento de sistemas de microfiltração;
- d) avaliar o desempenho da microfiltração no tratamento do efluente final.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A Indústria de papel e celulose

Por dispor de vantagens climáticas, extensão territorial e tecnologia florestal evoluída, o Brasil passou de uma posição insignificante no cenário mundial de papel e celulose no início dos anos 70, para uma posição de relativo destaque no final da década de 80 (MATTOS, 1999).

Segundo dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA, 2011) o Brasil produziu mais de 14 milhões de toneladas de celulose em 2010, apresentou crescimento de 6,4% em relação ao produzido em 2009. Praticamente toda a produção nacional de celulose, mais de 12 milhões de toneladas, é proveniente do processamento da madeira de eucalipto, ou seja, madeira de fibra curta, sendo que 11 milhões de toneladas dessa produção foi de pasta celulósica branqueada. O principal destino da celulose produzida no Brasil foi a exportação, representando 59% do total produzido. Dos 41% restantes, 30% foram destinados ao consumo próprio e 11% a vendas no mercado doméstico. No ano de 2009 o setor de celulose e papel do Brasil movimentou 28 milhões de reais, 15,4% a mais do que tinha movimentado no ano anterior.

Ainda com dados da Bracelpa (2011), a produção de papel em 2010 foi de quase 10 milhões de toneladas e houve crescimento de 4,4% em relação à produção de 2009. Destaca-se que a maior parte desse total, quase 50%, foi destinado à produção de embalagens, seguido da produção de papel para imprimir e escrever, além dos demais tipos. Em 2009, o Estado do Paraná contava com 31 fábricas de papel, 4 unidades industriais produtoras de celulose e 16 fábricas de pastas de alto rendimento. A produção de celulose do estado, no ano de 2008, atingiu 904.600 toneladas, com participação de 7,88% no total nacional, sendo 96% utilizados para consumo próprio das empresas (produção de papel) e 4% comercializados no mercado doméstico. Em 2009 a produção passou para 1,2 milhão de toneladas por ano. Essa produção tornou o Estado do Paraná o 5º maior produtor de pasta celulósica do Brasil naquele ano, sendo que, as frações mais representativas da produção do Estado são o papel cartão e o de embalagem.

A produção de papel, papelão e outros artefatos afins podem ocorrer a partir da fibra celulósica virgem, da reconstituição da polpa de papel reciclado (aparas) ou ambas combinadas. Uma dada unidade industrial pode apenas processar a polpa produzida externamente ou funcionar como uma unidade integrada (fábrica de papel e celulose)

(CETESB, 2008).

A principal fonte de matéria prima para a indústria de celulose e papel é a madeira proveniente de reflorestamento. Estima-se que somente de 1% a 2% do papel produzido no mundo tem base em fibras que não são provenientes da madeira (PEPE e SARAIVA, 2004).

As principais espécies reflorestadas são o pinus e o eucalipto. A espécie pinus pertence ao grupo das coníferas, sua madeira apresenta fibra longa e também é conhecida como *softwood* ou madeira macia. Já o eucalipto pertence ao grupo das folhosas, sua madeira contém fibra curta e pode ser chamada de *hardwood* ou madeira dura. O produto que se deseja obter da madeira para produção de papel é a celulose, no entanto, a madeira também é composta de lignina, hemicelulose e extrativos.

Na tabela 3.1 é demonstrada a distribuição dos diferentes constituintes da madeira de coníferas e folhosas.

Tabela 3.1: Composição química aproximada dos diferentes constituintes da madeira de coníferas e folhosas

Componentes Químicos	Composição (%)	
	Folhosas	Coníferas
Celulose	45 a 47	42 a 45
Hemicelulose	30 a 35	27 a 30
Lignina	20 a 24	28 a 30
Extrativos	3 a 5	3 a 5

Fonte: MORAIS et al (2005).

Como o constituinte da madeira que interessa para produção do papel é a celulose, esta deve ser separada dos demais constituintes do organismo vegetal, em especial, da lignina, que é uma macromolécula aromática tridimensional, de estrutura complexa, que atua como agente cimentante entre as células e proporciona rigidez à madeira. Sua eliminação ocorre por meio de oxidação (BERTAZZOLI E PELEGRINI, 2002).

No entanto, anteriormente à separação da celulose, é importante ressaltar que a produção da pasta celulósica se inicia nas áreas florestais, onde as árvores são derrubadas, desganhadas, descascadas e cortadas. Esse material é armazenado para o posterior processamento que pode ser mecânico, termomecânico, semiquímico ou químico. Piotto (2003) descreveu os diferentes tipos de processamentos:

- Processo Mecânico (MP): O rendimento da polpação que utiliza esse método varia

entre 93 a 98%. A aplicação da pasta obtida por processamento mecânico é limitada devido a oxidação da lignina residual, que faz com que o papel produzido escureça rapidamente, mesmo que tenha passado pela etapa de branqueamento. As principais aplicações da “pasta mecânica” são para produção de papel para jornal, revistas, embrulhos, etc.

- Processo Termomecânico (TMP): Com objetivo de provocar a transição do estado rígido para o estado plástico na madeira, esta sofre aquecimento com vapor (em torno de 140°C), seguindo para o processo de desfibrilamento em refinador a disco. O rendimento obtido por esse processo é levemente inferior ao obtido com o processamento mecânico (92 a 95%), no entanto, o produto final é um papel de melhor qualidade, com maior resistência mecânica e facilidade de impressão.
- Processo Semicímico: São acrescentados produtos químicos em baixas percentagens para facilitar a desfibragem. Nesse caso, o rendimento fica em torno de 60 a 90%. Na Europa o processo semicímico mais comum é conhecido pela sigla NSSC (*neutral sulphite semi chemical*).
- Processo Químico (Kraft): Para o processo químico, a madeira é tratada em vasos de pressão com soda cáustica e sulfeto de sódio. Esse processo permite obter uma pasta forte (kraft significa forte em alemão) já que dissolve a lignina preservando a resistência das fibras. O rendimento desse processo está entre 50 a 60%. A empregabilidade dessa polpa está na produção de papéis cuja resistência é o fator limitante, como as sacolas de supermercado, sacos de cimento, entre outros.

3.2 Impactos Ambientais associados à indústria de papel e celulose

Muitos são os impactos ambientais associados à indústria de papel e celulose, sendo que esses se iniciam nas áreas de cultivo florestal e acompanham todo o processo de produção da polpa e posteriormente do papel.

Os primeiros impactos ambientais associados a essa indústria, tiveram início com a derrubada de extensas áreas de florestas nativas para utilização da madeira na produção. Com a extinção das áreas florestadas, o reflorestamento surgiu como alternativa viável para alimentar a demanda de matéria prima da indústria florestal, no entanto, alguns impactos estão associados a eles como a redução da biodiversidade das áreas plantadas, compactação do solo e geração de ruídos pelo uso de maquinário pesado para retirada da madeira e contaminação dos recursos hídricos devido à ampla utilização de fertilizantes (CETESB, 2008).

Outro aspecto fortemente associado à indústria de papel e celulose é o alto consumo de água. Segundo Mounter et al (2005) o consumo pode oscilar entre 30 a 60 m³ de água por tonelada de celulose seca ao ar. Esse volume de água representa impacto ambiental não só pela retirada dos corpos d'água, mas também por estar diretamente relacionado com a geração de águas residuárias em todo processo. Para diminuir a geração de efluentes líquidos, algumas plantas (ou estações de tratamento) mais modernas preconizam a recirculação da água utilizada no processo.

Oliveira (2003) aponta as restrições na disponibilidade de água, os altos custos de instalação e de operação das estações de tratamento de efluentes, a capacidade limitada dessas estações, bem como as exigências da legislação como os principais agentes incentivadores para que as fábricas de papel e celulose limitem o consumo de água fresca e adotem o fechamento de circuitos de águas. O mesmo autor define fechamento de circuito de águas como a reutilização dos efluentes e recuperação dos insumos químicos de forma a minimizar os efeitos ambientais adversos, provocados pelo lançamento de poluentes no ambiente, sem, no entanto, comprometer o custo e a qualidade do produto final.

Os efluentes líquidos da indústria de papel e celulose causam consideráveis danos se dispostos diretamente nos corpos d'água sem tratamento, isso se deve, principalmente, à alta demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), compostos organoclorados, sólidos suspensos, resinas, lignina, entre outros (TAMBOSI, 2005).

Além disso, o consumo elevado de energia também é um aspecto ambiental associado à indústria de celulose e papel. Assim, as caldeiras de recuperação que queimam o licor negro gerado durante o processo produtivo são importantíssimas no sentido de diminuir o gasto energético dessas indústrias. Outro importante aspecto que colabora na economia de energia são as caldeiras de biomassa que queimam as cascas e pedaços de madeira rejeitados pelo processo, ação essa que, além de gerar energia evita o acúmulo de resíduos sólidos (CETESB, 2008).

Na Figura 3.1 são apresentados os poluentes dos diversos estágios da produção de papel.

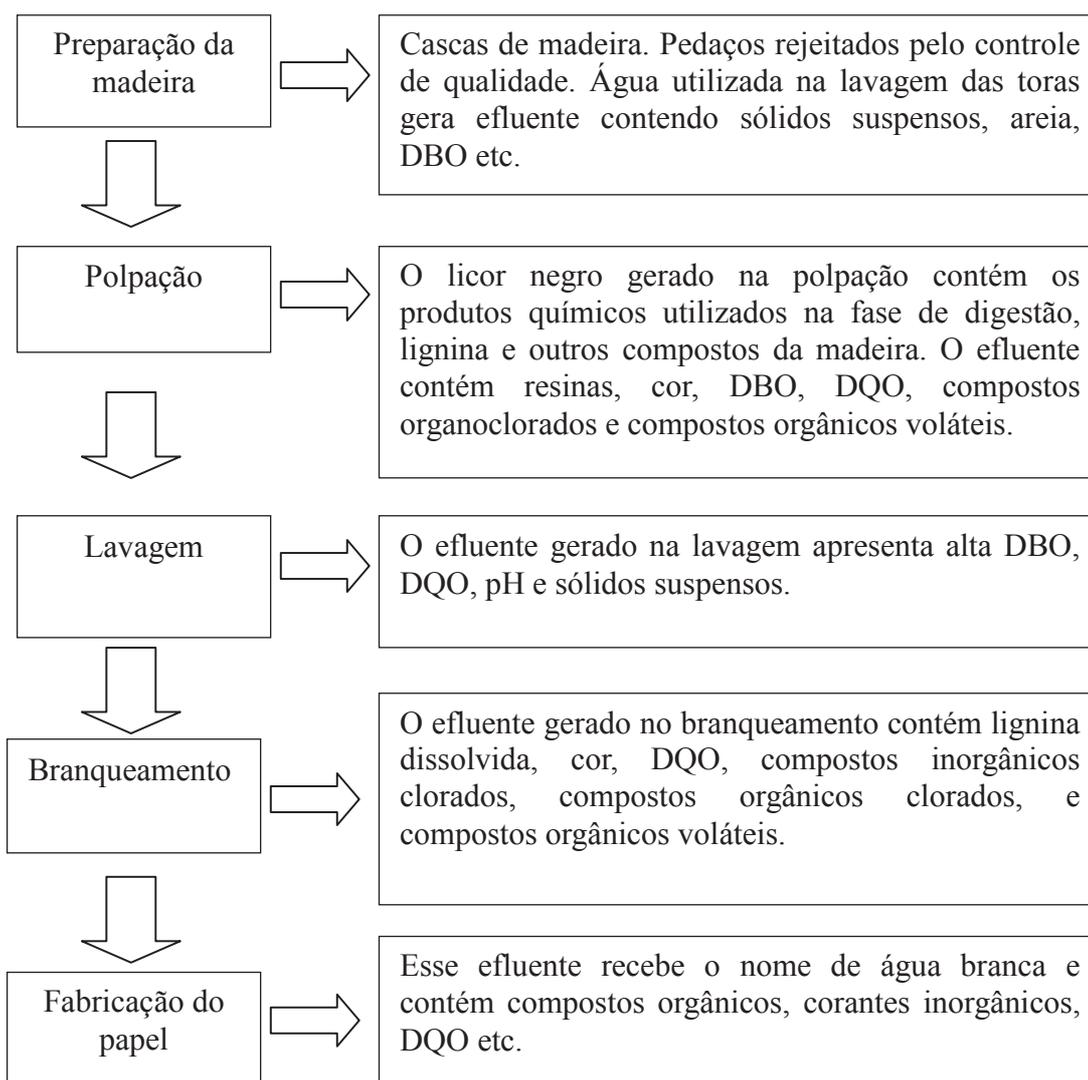


Figura 3.1 – Poluentes dos vários estágios do processo de fabricação do papel (POKHREL e VIRARAGHAVAN, 2004)

3.3 Tratamento do efluente da indústria de celulose e papel

Para adequar as características do efluente ao padrão de qualidade vigente para o corpo receptor ou a algum padrão de reúso, deve ser feito o tratamento das águas residuárias, que consiste na remoção dos poluentes presentes.

A escolha do processo a ser empregado no tratamento de águas residuárias depende das características físico-químicas da água a ser tratada, do grau de tratamento desejado e também dos custos operacionais do sistema escolhido.

Segundo Thompson et al (2001) o tratamento do efluente da indústria de celulose e papel deve abranger o tratamento preliminar que tem por objetivo a remoção de sólidos grosseiros e com posterior sedimentação ou flotação. O tratamento secundário é realizado

normalmente em reatores biológicos, e que se destina normalmente a remoção de matéria orgânica, além do tratamento terciário, para polimento do efluente e melhoria ainda maior da qualidade final do mesmo, nos casos em que a legislação ambiental seja mais restritiva ou que sejam preconizados padrões de reúso desse efluente pela indústria.

As características do efluente dependem do processo empregado na produção da celulose e do papel e das peculiaridades de cada unidade industrial. A DQO do efluente, por exemplo, pode variar de 1000 até 13000mg/L, dependendo do tipo de polpação empregada na produção de celulose. Os efluentes da indústria de celulose e papel podem conter materiais não biodegradáveis, matéria orgânica halogenada adsorvível (AOX), compostos fenólicos, entre outros. No entanto, a grande quantidade de material orgânico em suspensão e o alto teor de sólidos suspensos são os principais poluentes desse efluente (Buyukkamaci e Koken, 2010).

Em decorrência dos elevados teores de DBO e DQO do efluente industrial da produção de celulose e papel, o tratamento biológico é o processo mais empregado. Dentre eles, Medeiros (2008) indica o sistema de lodos ativados e as lagoas aeradas como os mais utilizados, todavia, há também uma forte tendência para os processos anaeróbios, devido, principalmente, ao baixo custo e à menor geração de lodo se comparado aos processos aeróbios.

Pohkrel e Viraraghavan (2004) discorrem sobre a empregabilidade dos processos anaeróbios para o tratamento do efluente da indústria de celulose e papel e indicam esse tipo de tratamento devido à alta carga orgânica apresentada pelo efluente, destacando o filtro anaeróbio, as lagoas anaeróbias e os reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) como boas opções tecnológicas. Apontam também a ampla utilização de processos de coagulação química e floculação, seguidos de sedimentação, para remoção de sólidos suspensos e polimento do efluente, sendo esses processos aplicados à etapa de tratamento terciário.

Além da coagulação química seguida de floculação e sedimentação alguns autores apontam os processos oxidativos avançados (CATALKAYA E KARGI, 2007; MORAIS, 2006) e a separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa) como as principais alternativas disponíveis para tratamento terciário desse efluente (KO e FAN, 2010; OLIVEIRA, 2003; ALMEIDA, 2002).

Mierzwa e Hespanhol (2005) expõem que a escolha de uma ou a combinação entre duas ou mais tecnologias é função do potencial de cada uma, dos mecanismos envolvidos na redução do contaminante de interesse e da qualidade final da água que se necessita.

3.3.1 Coagulação, floculação e sedimentação

O termo coagular provém do latim *coagulare* e significa juntar (CAMPOS e POVINELLI, 1979). A coagulação é considerada um processo já que envolve fenômenos químicos e físicos e surgiu da necessidade do homem em melhorar o aspecto visual da água previamente ao consumo. Existem registros do século XVIII descrevendo a adição de sais de alumínio no tratamento de águas minerais na Inglaterra. A partir de 1827, em Londres, era empregado sulfato férrico associado ao aquecimento da água coagulada para remoção de cor e turbidez (LIBÂNIO, 2005).

A coagulação consiste na desestabilização das partículas coloidais e suspensas presentes na água, por meio da ação do coagulante, usualmente um sal de ferro ou alumínio, em contato com a água e suas impurezas. Essas ações físicas e químicas duram poucos segundos, os íons metálicos de ferro e de alumínio, quando em solução aquosa, carregados positivamente, formam ligações com os átomos de oxigênio liberando os átomos de hidrogênio e reduzindo o pH da suspensão. Este processo denomina-se hidrólise e seu produto são as espécies hidrolisadas. Durante a etapa de coagulação deve haver agitação da massa líquida de forma a proporcionar o contato dessas espécies com as impurezas presentes causando sua desestabilização. Essa agitação é chamada de mistura rápida (LIBÂNIO, 2005).

Os principais mecanismos de coagulação, descritos por Di Bernardo (1993), Di Bernardo e Dantas (2005) e Libânio (2005) são: compressão de camada difusa, adsorção e neutralização, varredura e adsorção e formação de pontes.

Para entender esses mecanismos é necessário compreender alguns conceitos abordados por Campos e Povinelli (1979), Di Bernardo (1993), Di Bernardo e Dantas (2005) e Libânio (2005). As partículas coloidais e suspensas apresentam carga predominantemente negativa devido à dissociação de grupos funcionais como carboxilas ou hidroxilas presentes na superfície das partículas ou às imperfeições na estrutura das argilas minerais ou por efeito das substituições isomórficas ou ainda devido à adsorção de íons na superfície das partículas em suspensão por meio da ação das forças de Van Der Waals e ligações de hidrogênio.

Quando essas partículas são dispersas na água, íons de carga oposta se aproximam da sua superfície formando uma camada de íons positivos e negativos chamada camada compacta. Quando íons negativos se aproximam da camada compacta, atraem consigo outros íons positivos, formando a camada difusa. O conjunto dessas camadas, compacta e difusa, é chamado de dupla camada elétrica.

As partículas em suspensão se mantêm afastadas por conta da atuação da camada

difusa. A presença de um coloide na água implica na formação de um potencial elétrico (potencial de Nernst) que diminui com a distância a partir da superfície do mesmo. Na região de fronteira das camadas compacta e difusa o potencial elétrico é chamado de potencial zeta, que consiste, então, na diferença de potencial entre a superfície da camada compacta e o limite da camada difusa. As principais metas para que ocorra a coagulação são reduzir o potencial zeta a valores bastante baixos, de modo que não haja repulsão entre as partículas e o fornecimento de energia ao meio de modo que haja agitação e choque entre as partículas desestabilizadas.

Abaixo são discutidos os quatro mecanismos de coagulação

- Compressão da camada difusa: esse mecanismo é causado por meio da adição de íons de carga positiva que atravessam a camada compacta e reduzem o potencial zeta e a espessura da dupla camada, causando desestabilização das partículas coloidais e posterior aproximação das mesmas. Di Bernardo (1993) afirma que há independência da dosagem de coagulante com a concentração de partículas coloidais e não é possível causar a reversão de cargas dos coloides.
- Adsorção e neutralização de cargas: ocorre a desestabilização das partículas a partir da adsorção das espécies hidrolisadas, que tem carga positiva, à superfície das mesmas. Nesse caso a desestabilização ocorre com dosagens inferiores àquelas utilizadas no mecanismo de compressão da dupla camada. Há uma relação diretamente proporcional entre a dosagem do coagulante e a concentração dos coloides. Além disso, é possível a reversão de carga dos coloides.
- Varredura: nesse caso não há relação estequiométrica entre a dosagem de coagulante e a concentração dos coloides. De acordo com a quantidade de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns íons pode haver a formação de precipitados que adsorvem as partículas coloidais e envolvem as dissolvidas. Os flocos formados por meio desse mecanismo costumam ser maiores, sedimentando-se com maior facilidade.
- Adsorção e formação de pontes: nesse caso a coagulação é obtida por meio da ação de polímeros orgânicos naturais ou sintéticos, que podem atuar como coagulante por apresentarem longas cadeias, com vários sítios ionizáveis ao longo dessas. Segundo Mendes (1989), a atuação de polímeros ocorre por meio

da adsorção das partículas aos sítios ionizáveis, causando redução de sua carga ou então através da incorporação das partículas na cadeia dos polímeros.

Segundo Di Bernardo (2003) apesar de serem etapas distintas, a coagulação e a floculação são interdependentes. A função da coagulação é desestabilizar as partículas com auxílio de um coagulante, usualmente o sulfato de alumínio ou o cloreto férrico. O regime de operação deve ser turbulento, promovendo o contato das partículas com o coagulante, permitindo que haja aglomeração das mesmas, para o início da formação dos flocos. Na floculação, etapa subsequente à coagulação, o gradiente de velocidade é inferior ao usado durante a coagulação, já que, o objetivo da mesma, é dar condições para que os flocos se unam, tornando-se maiores.

Participam da floculação apenas fenômenos físicos de aglutinação das partículas, nos quais o principal objetivo é a redução de partículas coloidais e suspensas presentes na massa líquida. Para tanto, fornecem-se condições em termos de agitação e tempo de detenção, para que ocorram choques entre as partículas que foram previamente desestabilizadas na etapa de coagulação, objetivando a formação dos flocos a serem removidos na etapa de sedimentação (LIBÂNIO, 2005).

Campos e Povinelli (1979) ressaltam que nos estudos de coagulação e floculação, em escala laboratorial, devem ser observados alguns aspectos como a natureza das partículas a serem removidas, o tamanho dessas partículas, a concentração da solução do coagulante, o pH de operação e os gradientes de velocidade que serão empregados, tanto na unidade de mistura rápida (coagulação), quanto na de mistura lenta (floculação). A análise acurada desses parâmetros tornará o sistema mais eficiente, além de proporcionar eventual economia com reagentes e energia.

A importância dos estudos em escala laboratorial consiste também em o mesmo permitir variar com facilidade os parâmetros operacionais, fornecendo a oportunidade de realizar uma análise detalhada desses parâmetros em função dos resultados obtidos, para garantir o sucesso do sistema quando operado em escala industrial.

O uso de processos de precipitação química, ou seja, coagulação química, seguida de floculação e sedimentação é essencial em tratamento de água, entretanto, tem sido apontado em diversos estudos como processo importante também no tratamento de águas residuárias. Estudos visando a remoção de SST, turbidez, cor, DQO e outros contaminantes, no tratamento complementar ou terciário de águas residuárias industriais e domésticas, especialmente com respeito à otimização do desempenho de coagulante, determinação das condições

experimentais, avaliação do pH e investigação a respeito da adição de flocculantes são abundantes na literatura nacional e internacional.

Marguti et al (2008) objetivaram a remoção de fósforo em esgoto doméstico proveniente de reator UASB alcançando remoção de até 90% para dosagens iguais ou superiores a 60mg/L de cloreto férrico, sendo que observaram também, remoção de até 70% do carbono orgânico total (COT) nesse mesmo efluente e 40% para efluente tratado por lodo ativado convencional.

Fabreti (2006) avaliou o uso de coagulação/floculação/sedimentação como pós-tratamento do efluente sanitário de lagoa anaeróbia e facultativa obtendo boa remoção de fósforo, DQO, SST e clorofila a para dosagem de 264mg/L de sulfato de alumínio.

Viveiros (2008) realizou testes de tratabilidade do efluente da usina de reciclagem de plástico utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulante buscando por meio de testes de jarro as melhores condições de aplicação de coagulantes e faixas de pH. Observou a eficiência do tratamento por meio da remoção de turbidez e cor do sobrenadante. Escolheu-se o sulfato de alumínio como melhor coagulante, sendo a faixa de concentração ótima foi entre 311,58 a 324,08mg/L para pH 7,06 com remoção de mais de 90% de turbidez e cor nessas condições de operação.

Dominguez et al (2007) utilizaram o teste de jarro para determinar a capacidade de remoção de matéria orgânica em efluente de processamento de couro. Os autores variaram a dosagem de coagulante, a carga poluidora afluente, representada pela DQO, o tempo de floculação, o gradiente de velocidade da etapa de floculação e o pH durante a operação. Obtiveram remoção entre 20 e 55% para DQO, 28 a 89% para polifenóis e 29 a 90% para outros compostos aromáticos.

A utilização de coagulantes no tratamento de águas residuais, bem como de alguns polímeros auxiliares de floculação, tem sido muito difundida, em virtude da potencialidade do uso de processos físico-químicos, principalmente quando associados aos processos biológicos. O processo de precipitação química pode ser utilizado em diversos pontos do sistema de tratamento de efluentes, desde o afluente bruto até o pós-tratamento, precedendo uma eventual etapa de desinfecção (SANTOS, 2001).

Muitos pesquisadores defendem o uso de polímeros como auxiliares de floculação, afirmando que o uso dos mesmos, concomitante ao uso do coagulante, apresenta vantagens como: melhoria na qualidade do efluente tratado, redução no consumo do coagulante primário e redução do volume de lodo (WONG et al, 2006; SENA, 2005; OENNING JUNIOR, 2006; AMOO e AMUDA, 2007; ZHONG et al, 2003; WALKER e KELLEY, 2003). Esses

polímeros são denominados em muitos trabalhos como floculantes, pois atuam no processo de floculação trazendo como vantagem a formação de flocos maiores e mais resistentes quando comparados àqueles obtidos por coagulação (SENA, 2005).

Os polímeros usados no tratamento de água e efluentes são normalmente sintéticos e solúveis em água. Quanto a sua natureza iônica, podem ser aniônicos ou catiônicos e a densidade de carga também é variável. Quando em meio aquoso, os polímeros aniônicos apresentam sítios negativos ao longo da cadeia, os catiônicos apresentam sítios positivos e os não-iônicos não apresentam sítios ionizáveis (BOLTO E GREGORY, 2007). Na figura 3.2 é apresentado um esquema de aglomeração de partículas pela ação de polímeros.

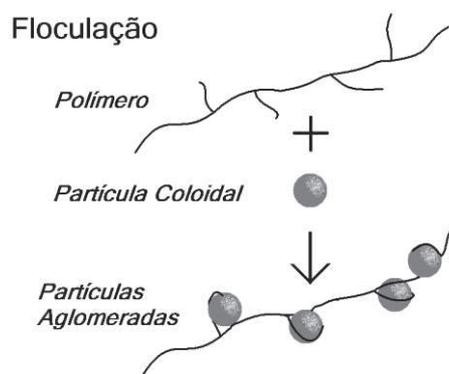


Figura 3.2 – Aglomeração de partículas pelo polímero dando origem aos grandes flocos (SENA, 2005)

O uso de polímeros como auxiliares de floculação proporcionam menores dosagens de coagulante, menor volume de lodo, redução de custos de até 25%, entre outras vantagens. Além disso, o fato de utilizar menos coagulante reduz a presença de alumínio no lodo a ser disposto posteriormente (ROUT et al. 1999).

Diante da grande variabilidade de polímeros disponíveis, são importantes os estudos em escala laboratorial para guiar o processo de tomada de decisão sobre qual espécie de polímero deve ser utilizada (AHMAD et al. 2008; WONG et al. 2006; AGUILAR et al. 2005; AL-MALACK et al. 1999).

Ahmad et al (2008) avaliaram a eficiência do tratamento dos efluentes de uma indústria de papel e celulose feita pelo conjunto coagulação-floculação-sedimentação com uso isolado e combinado de coagulante e polímero. Como parâmetros de avaliação foram observadas as remoções de: turbidez, sólidos totais, DQO, além do volume de lodo produzido e do tempo de sedimentação para cada condição operacional testada. Os melhores resultados obtidos foram 99,8% de redução de turbidez, 99,4% de redução de sólidos totais e 91,3% de

redução de DQO. Para obtenção de tais resultados, foram variados os parâmetros operacionais, como pH, dosagem e tipo de coagulante e adição de diferentes tipos e dosagens de polímeros durante os experimentos. Os autores concluíram que o uso combinado de coagulante com polímero melhorou a eficiência de todos os parâmetros observados além de produzir menor volume de lodo num tempo de sedimentação inferior.

Wong et al (2006) testaram 9 tipos de polímeros catiônicos e aniônicos com diferentes pesos moleculares e densidade de carga no tratamento do efluente de uma indústria de papel e celulose por meio de coagulação/floculação/sedimentação. Os experimentos foram realizados variando a dosagem de polímero de 0,5 a 15mg/L, com destaque para o fato de que o polímero foi usado individualmente e não como auxiliar do coagulante primário. A eficácia do tratamento foi medida em termos de remoção de turbidez, SST e DQO além da análise do volume e das características de sedimentabilidade do lodo. Os autores obtiveram remoção maior que 90% para todos os parâmetros analisados além de lodo com ótimas características de sedimentabilidade, já que o índice de volume de lodo (IVL) foi menor que 70mL/g em todas as configurações testadas, chegando a 14mL/g na configuração ótima, com dosagem igual a 5mg/L de polímero catiônico.

3.3.2 Membranas filtrantes

Uma tecnologia que tem sido largamente utilizada nas grandes indústrias de papel e celulose é o processo de separação por membranas de micro e ultrafiltração. Segundo Judd (2006) as membranas são barreiras físicas seletivas capazes de conter partículas que sejam maiores que os seus poros durante a passagem de uma solução. Não ocorrem alterações químicas ou biológicas de componentes durante o processo de filtração. Os processos de separação por membranas são divididos de acordo com a seletividade da membrana, definida pelo tamanho dos poros. Nesse sentido, os quatro principais processos são a osmose reversa, a microfiltração, a ultrafiltração e a nanofiltração.

No entanto, todos os processos têm os mesmos elementos comuns, sendo uma fonte de alimentação com o efluente que se deseja filtrar, o material retido pela membrana, que recebe o nome de concentrado, e o material filtrado, que também é conhecido como permeado.

A Figura 3.4 demonstra esquematicamente o processo de tratamento usando membranas filtrantes.

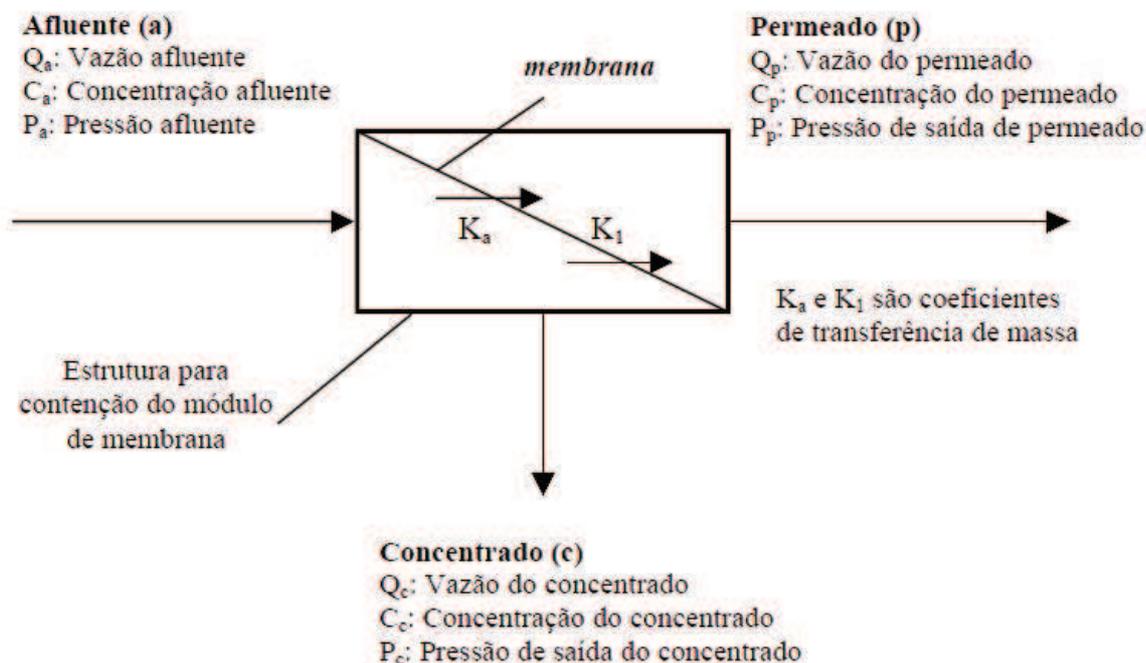


Figura 3.3 – Esquema de definição do processo por membranas - METCALF & EDDY (2003) *apud* VIDAL (2006)

As membranas são elaboradas por diferentes tipos de materiais, sendo os mais comuns o polímero e a cerâmica. A configuração do reator de membranas, ou seja, a sua geometria e a posição em relação ao fluxo de água, é determinante para o desempenho global da operação. Um projeto de aplicação de membranas deve prever, entre outras coisas, uma alta taxa de filtração, grande turbulência do efluente, para garantir contato com os poros da membrana, um baixo custo com energia por unidade de volume filtrado, um *design* que facilite a operação e a limpeza (JUDD, 2006).

Durante o processo de filtração pode ocorrer a deposição de material sobre a superfície da membrana e/ou na sua matriz. Essa deposição de material causa decréscimo no fluxo de operação e é chamado de *fouling* ou colmatação da membrana. Koros et al (1996) definiram *fouling* como resultado do processo de decréscimo no desempenho da membrana devido à deposição de substâncias suspensas ou dissolvidas sobre sua superfície externa e em seus poros.

Sendo assim, alguns fatores são determinantes para o êxito do tratamento por membranas como a qualidade do afluente, o modo de operação, a característica da membrana utilizada e o método de limpeza empregado. Todos esses fatores devem trabalhar em conjunto para garantir um bom fluxo de massa (transferência de massa por unidade de área de

membrana) durante a operação (LAUTENSCHLAGER, 2006). Para que isso seja possível, a colmatação do leito filtrante, ou *fouling*, deve ser evitada. Conforme Field et al. (1995) a deposição de material sobre a superfície do leito filtrante afeta diretamente a eficiência do processo, pois, bloqueia parcial ou totalmente os poros oferecendo resistência adicional ao fluxo do permeado.

Dentre as tecnologias de membranas filtrantes disponíveis, a microfiltração é caracterizada por apresentar macroporos (>50nm). Seu mecanismo típico de separação é o peneiramento e a faixa típica de operação está entre 0,08-2,0µm (METCALF & EDDY, 2003 *apud* VIDAL, 2006).

O pré-tratamento do processo de membranas, para garantir a qualidade do afluente e minimizar a colmatação do leito filtrante, pode ser feito por meio de tratamento físico-químico. Dentre eles destaca-se a coagulação química seguida de floculação e sedimentação como alternativa viável e que vem sendo apontada por muitos autores em todo o mundo.

Decarolis et al (2001) avaliaram diferentes condições operacionais no desempenho de membranas de ultrafiltração para tratamento terciário de efluente sanitário. Dentre as alternativas testadas, os autores avaliaram o efeito da adição de cloreto férrico na água de alimentação da membrana de ultrafiltração e concluíram que o tratamento com coagulação desestabiliza as partículas coloidais, resultando em partículas maiores que são retidas prontamente pela membrana.

Khayet et al (2011) indicam o processo de coagulação/floculação/sedimentação como pré-tratamento à microfiltração para diminuir a colmatação do leito filtrante e aumentar a vida útil da membrana.

Gabelich et al. (2002) afirmam que os processos de pré-tratamento representam uma melhora significativa em relação aos custos totais e à operação das membranas filtrantes.

Choi e Dempsey (2004) utilizaram a coagulação *in-line*, ou seja, o uso de coagulantes sem a etapa de sedimentação, como pré-tratamento de uma unidade de ultrafiltração. O estudo procurou definir as melhores dosagens de coagulante em função do desempenho da unidade de ultrafiltração. Os autores afirmam que a resistência à filtração pode aumentar ou diminuir devido a adição do coagulante, ou seja, a etapa de pré-tratamento pode prejudicar a filtração se não houver um estudo preliminar em escala piloto.

Nordin e Jönsson (2006) estudaram os aspectos operacionais de uma planta de ultrafiltração usada para tratar o efluente do branqueamento de uma indústria de celulose e papel. Os autores observaram valores de remoção de DQO e sólidos totais de 96 e 93%, respectivamente.

Em alguns casos, quando o objetivo principal do tratamento com membranas é retornar a água ao processo produtivo, a tecnologia empregada é a osmose reversa, caracterizada por poros densos com faixa típica de operação entre 0,0001-0,001 μ m (METCALF & EDDY, 2003 *apud* VIDAL, 2006).

Zhang *et al* (2009) avaliaram a osmose reversa como forma de tratamento final para o efluente de uma indústria de celulose e papel. O efluente da ETE era primeiramente tratado numa unidade de microfiltração. Essa unidade recebia seu afluente com valores superiores a 600 mg/L de DQO e mais de 140 mg/L de sólidos suspensos. Após o tratamento com microfiltração os sólidos eram reduzidos a valores inferiores a 2 mg/L e a remoção de DQO foi de 92,1%, ou seja, a DQO no efluente era menor que 50 mg/L. Esses resultados, apesar de serem satisfatórios para os padrões de lançamento desse efluente no ambiente, ainda não atendem aos padrões de reúso, podendo causar problemas ao processo produtivo, em caso de recirculação. Para melhorar a eficiência do tratamento foi empregada uma unidade de osmose reversa logo após a microfiltração. A remoção média de DQO apresentada pela unidade de osmose reversa foi de 91,7%, chegando a valores de concentração de DQO inferiores a 5 mg/L.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo compreende a descrição dos materiais, equipamentos e métodos experimentais utilizados para realização dessa pesquisa. São detalhados os sistemas de coagulação/floculação/sedimentação em escala de bancada e da unidade de microfiltração tangencial, bem como os ensaios para realização de cada etapa da pesquisa.

4.1 Caracterização do efluente

Os efluentes empregados nesta pesquisa foram coletados em uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel e celulose de grande porte do Estado do Paraná. A referida estação possui vazão de projeto de 4000 m³/dia e apresenta as seguintes unidades de tratamento em sequência: calha parshall, grade, caixa de areia, decantador primário, caixa de mistura de nutrientes, antiespumante e correção de pH, torre de resfriamento, reator biológico aerado de crescimento aderido (MBBR), tanque de aeração, decantador secundário e unidade de ultrafiltração. O fluxograma desta estação encontra-se apresentado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 Métodos utilizados para as análises físico-químicas

Parâmetro	Métodos
Turbidez	Standard Methods 2130B (APHA, 1999)
Cor	Standard Methods 2120C (APHA, 1999)
DQO	Standard Methods 5220D (APHA, 1999)
DBO	Standard Methods 5210B (APHA, 1999)
pH	Standard Methods 4500 - H ⁺ B (APHA, 1999)
ST	Standard Methods 2540B (APHA, 1999)
SST	Standard Methods 2540D (APHA, 1999)
Alcalinidade	Standard Methods 2320B (APHA, 1999)
Nitrogênio amoniacal	Standard Methods 4500 - NH ₃ B e C (APHA, 1999)
NTK	Standard Methods 4500 N _{org} B (APHA, 1999)
Fósforo total	Standard Methods 4500 - P E (APHA, 1999)
OD	Standard Methods 4500 - O G (APHA, 1999)
AOX	Standard 9562 (ISO, 2004)
Lignina (fenol)	Standard Methods 5550B (APHA, 1999)

Depois de caracterizado, o efluente era submetido ao tratamento por meio de coagulação, floculação e sedimentação em aparelho do tipo *jar-test* da marca MILAN®, modelo JT102, contendo 06 jarros de acrílico, com capacidade de 2 litros cada. Cada jarro contém uma pá que sofre rotação e causa movimento da massa líquida. O equipamento (Figura 4.3) apresenta também um controlador analógico do gradiente de velocidade das pás. Segundo Azevedo Netto (1987) ensaios de bancada em *jar-test* permitem simular as condições operacionais ideais de coagulação e floculação, variando a dosagem de coagulante, os gradientes de velocidade de mistura rápida e lenta bem como os tempos de mistura rápida e lenta, possibilitando uma análise precisa do processo.

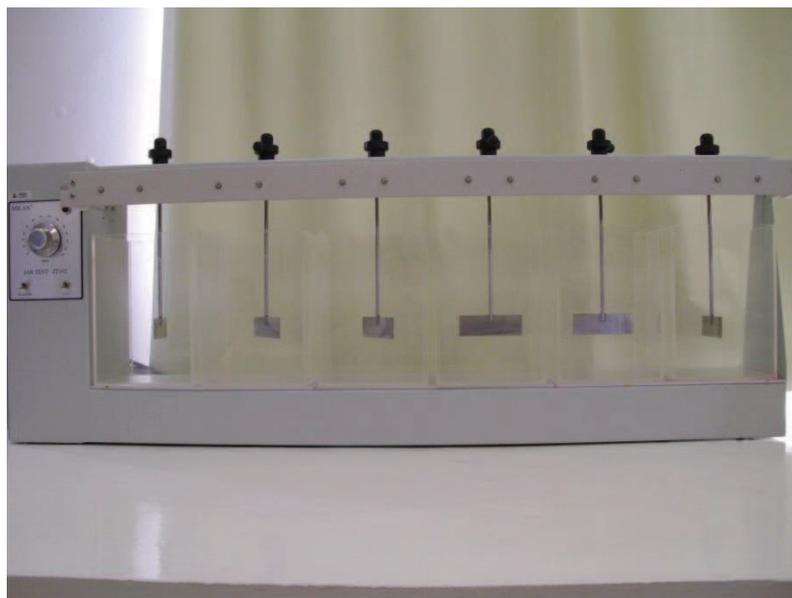


Figura 4.2 – Fotografia do *jar-test* utilizado na pesquisa

Para verificar o êxito do tratamento empregado no laboratório o efluente tratado, denominado sobrenadante, era avaliado em termos de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO, denominados de parâmetros de resposta. Nos ensaios 09 e 10 foram analisados além desses parâmetros os AOX e a lignina do sobrenadante, para verificar se havia remoção desses contaminantes.

A primeira etapa dessa pesquisa consistiu em conhecer as características do efluente e avaliar o efeito da variação do gradiente de mistura lenta, da dosagem de coagulante, do uso combinado de coagulante com polímero, dos tipos de polímero, da dosagem do mesmo e da velocidade de sedimentação nos parâmetros de resposta. O coagulante usado nessa e nas outras etapas da pesquisa foi o cloreto de polialumínio (PAC - $Al_n(OH)_m(Cl_3)_{n-m}$).

A segunda etapa foi dividida em duas fases. Na primeira fase foi testada uma faixa mais ampla de dosagens do coagulante, por repetidas vezes, para consolidar a escolha das melhores configurações e também para verificar se a tecnologia estudada seria capaz de suportar as variações das características iniciais do efluente, causadas pelas diferenças no processo produtivo além de possíveis problemas em alguma etapa da ETE a cada coleta. Foi avaliada também a variação das características de sedimentabilidade do lodo, causada pelas diferentes dosagens de coagulante e polímero empregadas. Na segunda fase foi estudado o efeito da diminuição do tempo de floculação nos resultados de remoção dos parâmetros analisados.

Na terceira etapa foram repetidas as melhores configurações operacionais obtidas até então para averiguar se o tratamento era capaz de remover, além do que já estava sendo

observado, também lignina e AOX. Além disso, o efluente coletado a partir da melhor configuração foi filtrado numa unidade piloto de microfiltração tangencial para verificar a viabilidade do emprego dessa tecnologia para o tratamento complementar de efluente gerado na coagulação/precipitação e dessa forma poder avaliar essa alternativa de pré-tratamento de sistemas de microfiltração.

4.2.1 Primeira etapa: ensaios preliminares de coagulação

Para realização da primeira etapa do trabalho foram feitas 03 coletas na ETE da indústria estudada. As coletas foram realizadas em média a cada três semanas.

Em todos os ensaios dessa etapa o efluente foi caracterizado previamente e submetido aos ensaios em *jar-test* a fim de avaliar a eficiência do processo variando os aspectos operacionais.

4.2.1.1 Ensaio 01: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante, sem adição de polímero e com variação do gradiente de velocidade de mistura lenta

Apesar do prévio conhecimento que a adição de polímeros auxilia no tratamento de efluentes e proporciona melhores resultados na qualidade final do efluente, além da redução na formação de lodo, entre outros ganhos, esse ensaio foi feito sem adição de auxiliar de floculação. Assim, o objetivo era averiguar se o coagulante empregado seria capaz de proporcionar eficiências elevadas de remoção dos parâmetros analisados. Caso isso fosse observado, não haveria necessidade de adicionar polímeros para auxiliar no tratamento, o que representaria uma economia com produtos químicos em caso de tratamento em escala real. As dosagens do coagulante PAC (DC) testadas foram 40, 60, 80 e 100mg/L.

A mistura rápida tem como função misturar o coagulante em toda massa líquida, promovendo a desestabilização das partículas. Já a mistura lenta permite a colisão e posterior agrupamento das partículas desestabilizadas promovendo a formação de flocos, que devem ter massa suficiente para sedimentar na etapa subsequente. O gradiente de velocidade da mistura rápida (G_c), bem como os tempos de mistura rápida (T_c) e lenta (T_f) foram definidos previamente. O gradiente de velocidade da mistura rápida utilizado foi de $500s^{-1}$, máximo alcançado pelo aparelho utilizado, durante 60 segundos e foram testados dois gradientes de velocidade para mistura lenta 40 e $80s^{-1}$ durante 10 minutos. O tempo de mistura rápida era

contado a partir do contato do coagulante com a massa líquida. O início da rotação acontecia simultaneamente à adição do coagulante. Logo que o gradiente de velocidade era diminuído, passado o tempo de mistura rápida (60 segundos), iniciava-se a etapa de mistura lenta. Após o tempo de mistura lenta (10 minutos) o aparelho era desligado e o sobrenadante coletado após o término do tempo de sedimentação (T_s).

Por tratar-se do primeiro ensaio, ainda não eram conhecidas as características que o efluente tratado iria apresentar, logo, não se podia afirmar qual a melhor velocidade de sedimentação (V_s) a ser adotada. Nesse caso, foram investigados tempos de sedimentação diferentes. O objetivo dessa análise era buscar o menor tempo de sedimentação possível que resultasse em boa remoção dos contaminantes. Isso representa, na prática, decantadores menores com tempos de detenção também mais baixos. Foram analisados três tempos de sedimentação, 2, 4 e 6 minutos que implicaram nas seguintes velocidades de sedimentação: 4, 2 e 1,3cm/min. Esses tempos eram contados a partir do término da mistura lenta, quando o equipamento *jar-test* era desligado e a massa líquida entrava em repouso, permitindo a sedimentação dos flocos formados. Sendo assim, logo após o término dos tempos de sedimentação eram retirados de cada jarro três amostras de sobrenadante de aproximadamente 20mL.

Os parâmetros analisados para comprovar o efeito das variações operacionais foram turbidez, cor aparente e DQO.

4.2.1.2 Ensaio 02: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante e testando três polímeros como auxiliares de floculação

A partir do ensaio 02 passou-se a utilizar o coagulante combinado com polímeros auxiliares de floculação. Foram testados três polímeros sendo os três aniônicos, com faixas de aplicação de pH diferentes. Polímero PRAESTOL 2540 (pH 06 a 10), polímero PRAESTOL 2510 (pH 01 a 08) e polímero PRAESTOL 2510 (pH 03 a 08). As dosagens de PAC utilizadas foram de 100 e 150mg/L combinadas com 1, 2 e 3mg/L de polímero (DP).

O gradiente de velocidade da mistura rápida, bem como os tempos de mistura rápida e lenta foram mantidos os mesmos do ensaio anterior. O gradiente de velocidade da mistura lenta foi definido em $80s^{-1}$, durante 10 minutos. O polímero era adicionado no início dessa etapa. As velocidades de sedimentação empregadas foram 2, 1,3 e 0,80cm/min o que implicou em tempos de sedimentação iguais a 4, 6 e 10 minutos contados após a estabilização do movimento rotacional no líquido proveniente da fase de floculação. Após o término da

sedimentação era feita a coleta de aproximadamente 20mL de sobrenadante para cada tempo de sedimentação. As amostras foram submetidas às análises de turbidez, cor aparente e DQO.

4.2.1.3 Ensaio 03: ensaio preliminar de coagulação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico como auxiliar de floculação

Esse ensaio foi realizado empregando o polímero PRAESTOL 2540 (pH 06 a 10), como auxiliar de floculação, com objetivo de verificar as eficiências obtidas no ensaio anterior, além de variar a dosagem de PAC numa faixa mais ampla do que a testada até então. Sendo assim, além das dosagens testadas anteriormente (100 e 150mg/L) foi utilizada nesse ensaio a dosagem de 200mg/L de PAC, todas combinadas com 1, 2 e 3mg/L de polímero. Mantiveram-se as mesmas configurações do ensaio anterior, gradiente de velocidade de $500s^{-1}$ na mistura rápida durante 60 segundos, gradiente de velocidade de $80s^{-1}$ na mistura lenta durante 10 minutos e velocidades de sedimentação de 2, 1,3 e 0,80cm/min o que implicava em tempos de sedimentação iguais a 4, 6 e 10 minutos.

O fluxograma dos ensaios da primeira etapa é apresentado na figura 4.3.

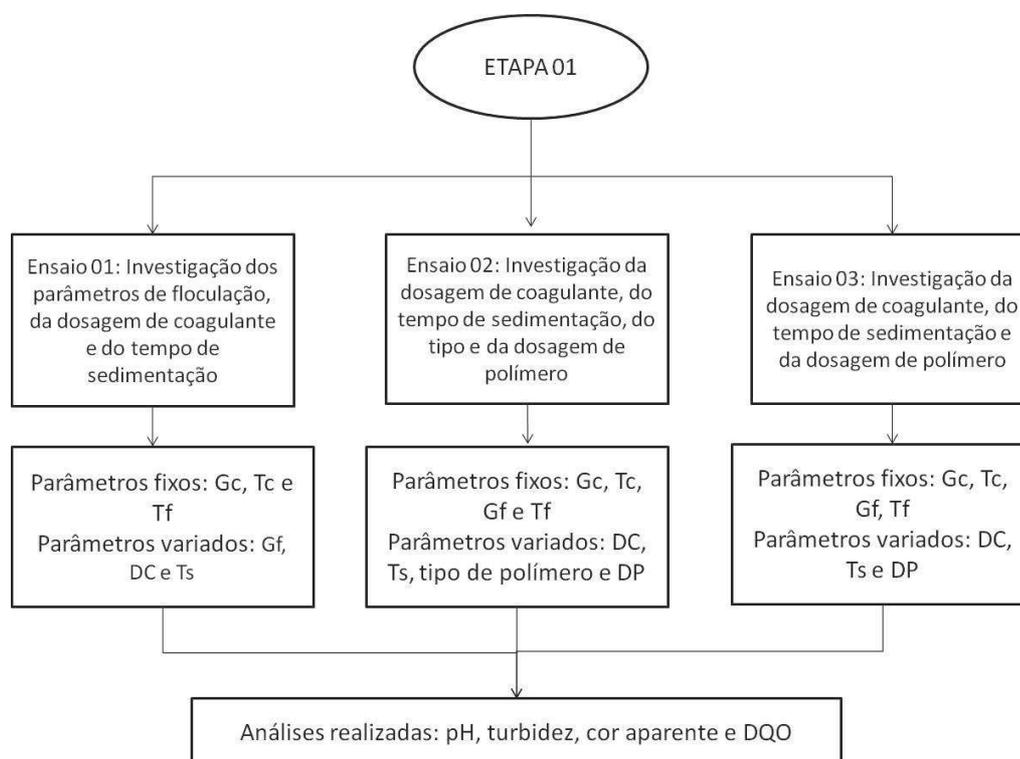


Figura 4.3: Fluxograma dos ensaios da etapa 01

4.2.2 Segunda etapa: ensaios principais de coagulação

A segunda etapa foi dividida em duas fases. Para realização da primeira fase da segunda etapa da pesquisa foram feitas 03 coletas na ETE da indústria estudada, em média a cada três semanas.

A partir da análise da etapa 01, fixaram-se os valores de dosagem de coagulante a serem testados, bem como o polímero utilizado e suas dosagens. O polímero escolhido foi o PRAESTOL 2540 (pH 06 a 10). As dosagens de coagulante testadas foram 50, 100, 125, 150, 175, 200 e 250mg/L. Foram feitos ensaios só com o coagulante, que serviram como testemunha dessa pesquisa, e ensaios combinando coagulante e polímero. As dosagens de polímero estudadas foram 1, 2 e 3 mg/L.

Os gradientes de velocidade e os tempos de mistura rápida e lenta foram mantidos os mesmos da etapa 01. A coleta de sobrenadante foi feita após 6 minutos de sedimentação, sendo assim a velocidade de sedimentação adotada foi de 1,3cm/min, valor atribuído a partir da análise dos resultados da primeira etapa. O sobrenadante foi submetido à análise dos parâmetros: turbidez, cor aparente e verdadeira. Nos casos em fosse observado remoção desses parâmetros era feita também a análise de DQO no sobrenadante para que fosse possível calcular sua remoção.

Foi feita também a análise das características de sedimentabilidade do lodo de cada configuração de tratamento. Para realização dessa análise foi estabelecido o índice IVL – índice de volume de lodo - que representa a estimativa da produção de lodo do tratamento empregado e permite avaliar sua sedimentabilidade.

A determinação do IVL foi realizada vertendo-se o conteúdo dos jarros do *jar-test* em provetas de 1 litro e permitindo a total sedimentação dos flocos formados durante 30 minutos. Após esse tempo, era feita a medição da camada de lodo formada. Logo após a medição da camada de lodo todo o conteúdo da proveta era agitado e submetido à análise de sólidos suspensos. A partir desses resultados o índice IVL foi estimado pela equação 1:

$$IVL = \frac{h \times 1000}{SST} \quad \text{Equação 01}$$

Em que:

IVL: índice de volume de lodo (mL/g);

h: altura da camada de lodo formada no fundo da proveta (mL);

SST: sólidos suspensos da amostra (mg/L);

Para realização da segunda fase da segunda etapa foram feitas 02 coletas na ETE da indústria estudada. Foi diminuído o tempo de mistura rápida de 10 minutos para 07 e 05 minutos uma vez que se notou em ensaios anteriores, a rápida formação dos flocos. Foram avaliados os efeitos dessa diminuição nas remoções dos parâmetros resposta. Foram testadas as melhores dosagens de coagulante obtidas nos ensaios anteriores, 175, 200 e 250mg/L, combinadas com 1, 2 e 3mg/L de polímero. O polímero utilizado foi o PRESTOL 2540 (pH 06 a 10). Os ensaios sem adição de polímero foram mantidos como testemunha do tratamento. O êxito do tratamento era avaliado em função das remoções de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO.

O fluxograma dos ensaios da primeira e segunda fase da etapa 02 está apresentado na figura 4.4.

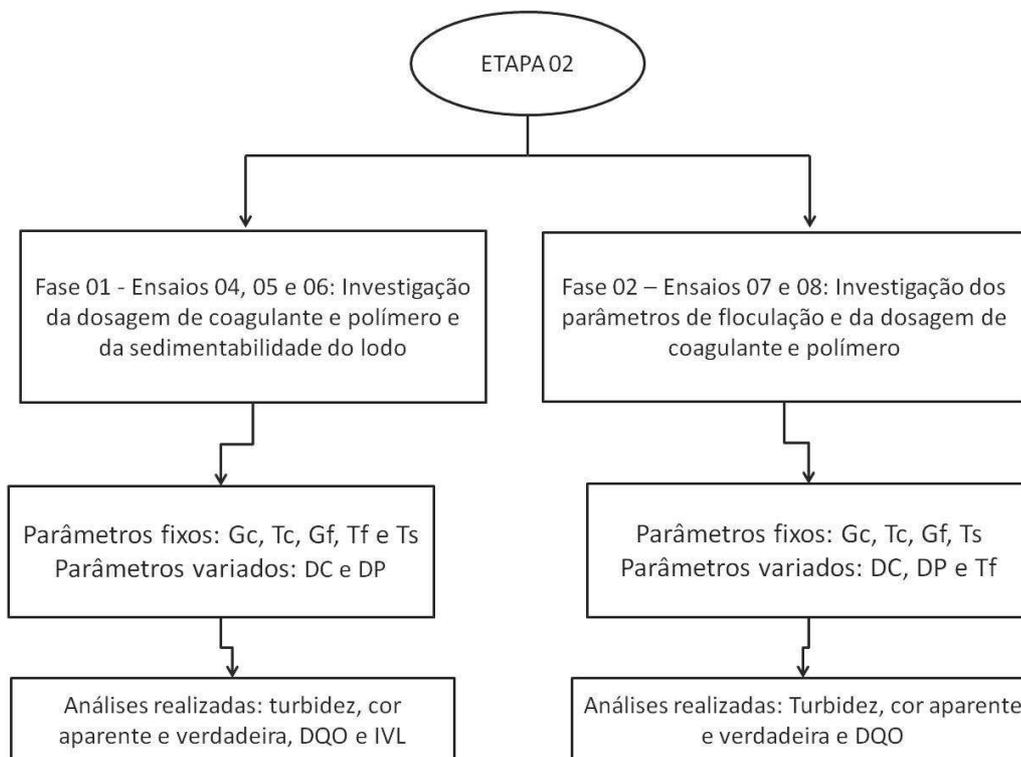


Figura 4.4: Fluxograma dos ensaios da primeira e segunda fase da etapa 02

4.2.3 Terceira etapa: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação e ensaio de microfiltração

Para realização da terceira etapa foram feitas 02 coletas na ETE da indústria estudada, em média a cada três semanas.

O objetivo do primeiro ensaio foi verificar se o tratamento empregado seria capaz de remover lignina e AOX, além dos parâmetros que já estavam sendo observados nos ensaios

anteriores.

Foi realizado um ensaio aplicando a melhor configuração em termos de dosagem de coagulante adotada por meio da análise dos ensaios anteriores. A dosagem de coagulante testada nessa fase foi de 250mg/L combinada com 1, 2 e 3mg/L de polímero. A partir da análise da segunda fase da etapa 02 foi mantido 07 minutos como tempo de mistura lenta.

O sobrenadante, coletado após 06 minutos de sedimentação, foi analisado para que fossem observadas as remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, lignina e AOX.

Para análise desse ensaio, foi caracterizado não só o efluente coletado do decantador secundário da ETE, mas também o efluente bruto da ETE, sem qualquer tratamento. Isso permitiu vislumbrar as remoções proporcionadas pelas tecnologias empregadas na ETE além das remoções obtidas pelo pós-tratamento aplicado no laboratório.

A segunda fase foi feita numa unidade piloto de microfiltração tangencial. Foram realizadas três bateladas de ensaio de microfiltração sendo uma com água destilada, uma com efluente previamente tratado por coagulação/floculação/sedimentação e outra com o efluente sem pré-tratamento, ou seja, aquele coletado na saída do decantador secundário da ETE da indústria estudada.

Antes de cada ensaio de filtração a membrana era submetida à limpeza química durante período de uma hora, recirculando no sistema uma solução de hidróxido de sódio 5% aquecida a 60⁰C.

Aplicando-se a melhor configuração de coagulação/floculação/sedimentação indicada pelas fases anteriores foi obtido o efluente para ser filtrado. Foi utilizado então 500s⁻¹ como gradiente de velocidade de mistura rápida durante 60 segundos, 80s⁻¹ como gradiente de velocidade de mistura lenta durante 10 minutos, 6 minutos de sedimentação, ou velocidade de sedimentação de 1,33cm/min e dosagem de coagulante de 250mg/L associada a 1mg/L de polímero. Foram realizados ensaios no *jar-test* até que fossem coletados aproximadamente 12 litros de efluente tratado para ser filtrado na unidade de microfiltração. Foi coletado aproximadamente um litro de sobrenadante de cada jarro. Antes de passar pela unidade piloto de microfiltração esse efluente foi analisado em termos de temperatura, pH, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, oxigênio dissolvido, condutividade, alcalinidade, sólidos totais, sólidos suspensos totais, DBO e lignina. Isso permitiu avaliar as remoções desses parâmetros pelo pós-tratamento empregado.

Esse efluente foi filtrado por três horas na unidade piloto de microfiltração. O permeado foi coletado a cada meia hora e seu volume medido para estimar o fluxo do

permeado. As amostras de permeado coletadas a cada meia hora foram analisadas em termos de temperatura, pH, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, oxigênio dissolvido, condutividade e alcalinidade. Após as duas horas, as amostras de permeado foram misturadas em um recipiente único. Essa amostra composta foi avaliada em termos de sólidos totais, DBO e lignina. Isso permitiu avaliar as remoções desses parâmetros pela microfiltração. Esses parâmetros não puderam ser analisados em cada amostra de permeado porque o volume coletado a cada meia hora de operação não era suficiente para todas as análises.

Para avaliar se o pré-tratamento empregado melhorou efetivamente o desempenho da unidade de microfiltração foi filtrado o efluente do decantador secundário coletado na ETE da indústria estudada sem tratamento prévio. Esse efluente também foi filtrado por três horas e o permeado coletado a cada meia hora. Foi medido o volume coletado de permeado para avaliar o fluxo da filtração. Esse fluxo foi comparado com o fluxo obtido durante a filtração do efluente que recebeu o pré-tratamento. O roteiro de operação foi o mesmo da batelada anterior e as amostras de permeado sofreram as mesmas análises e depois foram misturados em um recipiente único, formando a amostra composta.

Além de filtrar o efluente com e sem tratamento prévio, foi filtrado na unidade piloto água destilada por três horas e o permeado coletado a cada meia hora teve seu volume medido. A filtração da água destilada ocorreu anteriormente às demais. O fluxo calculado para filtração da água destilada representa o máximo fluxo possível para a unidade piloto utilizada, já que não há nenhuma obstrução dos poros da membrana quando somente água é filtrada.

A comparação desses resultados serviu para mostrar se o pré-tratamento empregado causava melhoria significativa na taxa de filtração e, por conseguinte, na diminuição da colmatação da membrana. Além disso, permitiu-se avaliar a remoção dos contaminantes, proporcionada pela microfiltração.

Oliveira (2003) utilizou membrana de ultrafiltração para tratar a água branca de uma indústria de papel e celulose e também avaliou o fluxo de permeado da unidade durante a filtração de água limpa e comparou com o fluxo de permeado durante a filtração do efluente para verificar se ocorria colmatação do leito filtrante da membrana.

O fluxograma dos ensaios da terceira etapa está apresentado na figura 4.5.

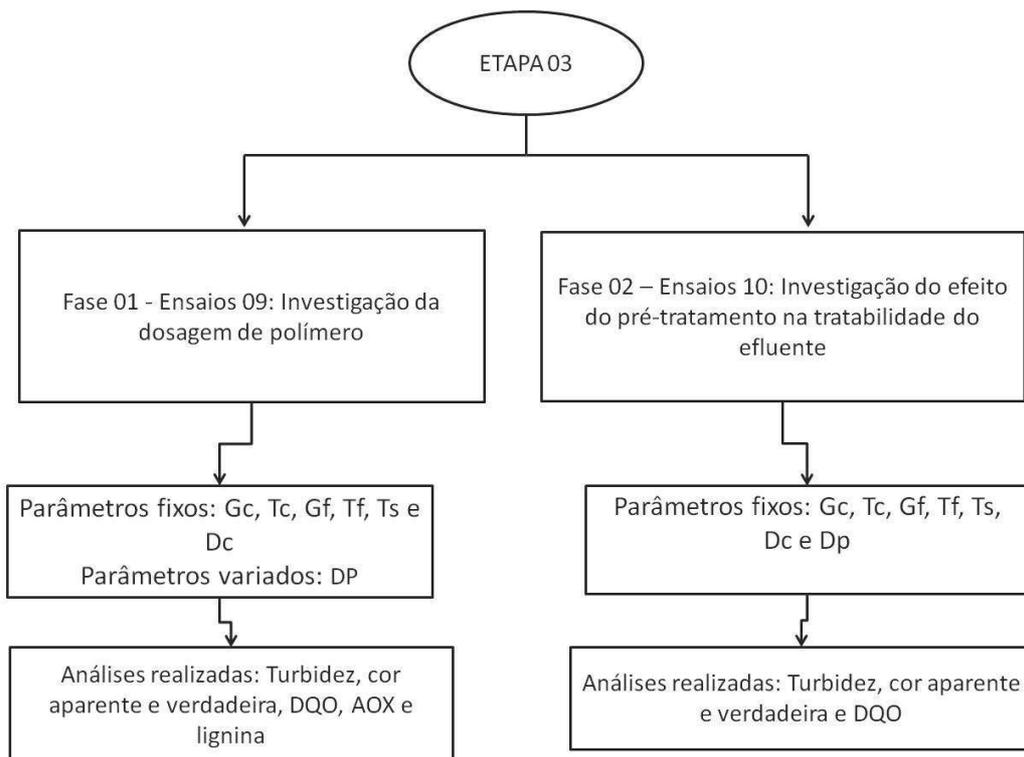


Figura 4.5: Fluxograma dos ensaios da etapa 03

4.2.3.1 Caracterização da unidade de microfiltração tangencial

A unidade piloto de microfiltração (representação esquemática e foto apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente) possui um módulo de membrana de microfiltração de cerâmica com diâmetro médio de poro de $0,2\ \mu\text{m}$ e área efetiva de filtração de $0,00475\text{m}^2$.

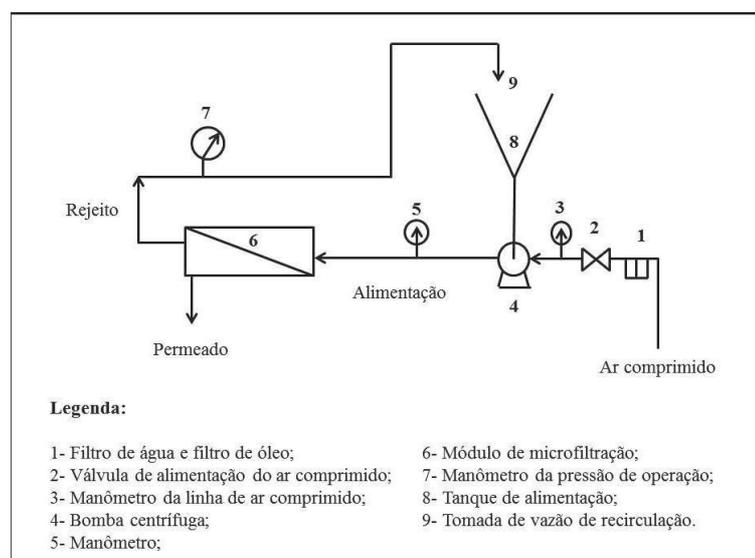


Figura 4.6 – Desenho esquemático do equipamento piloto utilizado nos experimentos de microfiltração

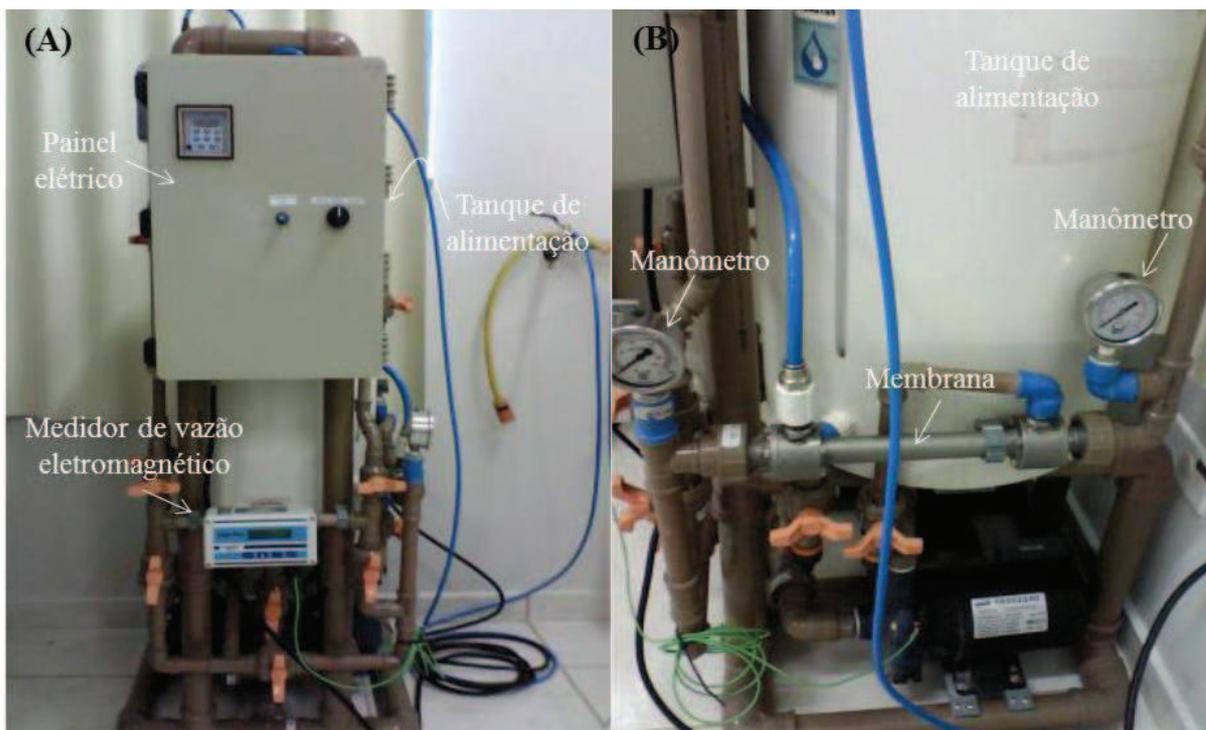


Figura 4.7 – Fotografia do equipamento piloto utilizado nos experimentos de microfiltração: (A) vista frontal e (B) vista lateral

A pressão aplicada (ΔP) na membrana foi gerada por uma bomba centrífuga instalada no sistema. O tanque de alimentação do sistema era de PVC com volume de 60 L .

A unidade de microfiltração foi operada em batelada, o concentrado era recirculado ao tanque de alimentação continuamente e o filtrado (permeado) era coletado na parte inferior da unidade.

A unidade piloto era munida de mecanismo de retrolavagem com ar comprimido vindo de um compressor. Este mecanismo era regulado pela abertura e fechamento de válvulas solenóides. No momento da retrolavagem uma das válvulas solenóides abre e permite a entrada de ar que impulsionava parcela do permeado em sentido inverso da filtração, removendo continuamente parte das partículas que se acumulam na superfície da membrana. Durante o pulso de retrolavagem não há interrupção de entrada de água no sistema.

As condições operacionais empregadas foram: pressão aplicada na membrana de 0,25 MPa; pressão de retrolavagem de 0,3 MPa; intervalo de retrolavagem de 10 minutos, velocidade tangencial de 3,9 m/s, vazão da bomba de alimentação de 6,6L/min, temperatura média de operação de 30°C, volume de efluente de cada ensaio de 12 litros, período de operação de 03 horas e coleta de permeado a cada 30 minutos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho experimental em escala de bancada que contemplou as etapas de ensaios preliminares, ensaios principais e ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação além de ensaio de microfiltração tangencial em unidade piloto com efluente coletado da ETE de indústria de papel e celulose.

5.1 Resultados da primeira etapa: ensaios preliminares de coagulação/floculação/sedimentação

O objetivo dessa etapa foi avaliar a eficiência do coagulante utilizado individualmente e combinado com diferentes tipos de polímero, além de combinar diferentes dosagens de coagulante com diferentes dosagens de polímero. Fazem parte dessa etapa os três primeiros ensaios.

5.1.1 Caracterização do efluente da primeira etapa

Todos os efluentes industriais apresentam diferentes graus de complexidade nas suas características por serem resultantes, em geral, da mistura de diversos compostos advindos muitas vezes de todo o pátio fabril, como das partes produtiva, cozinha, refeitórios, banheiros, etc. Sendo assim, podem apresentar características que variam muito a cada coleta, justificando, portanto, no caso da presente pesquisa, a caracterização prévia do efluente sempre que o mesmo chegava ao laboratório antes da realização dos ensaios de coagulação/floculação/sedimentação.

Durante todas as etapas da pesquisa o efluente era caracterizado antes de passar pelos tratamentos.

Na tabela 5.1 são apresentados os parâmetros monitorados nas coletas (numeradas de 01 a 03) realizadas durante a primeira etapa. As variações observadas a cada coleta são resultado não só da complexa mistura de efluentes de toda indústria, mas também dos diferentes tipos de papel que são produzidos a cada período, utilizando todas as máquinas ou só parte delas, mais ou menos produtos químicos, entre outros aspectos que podem mudar temporalmente e que refletem nas características do efluente no final da estação.

Tabela 5.1: Caracterização do efluente nos ensaios da primeira etapa

Parâmetro	Ensaio 01	Ensaio 02	Ensaio 03
Turbidez (uT)	25,1	6,18	18,3
Cor aparente (uC)	606	364	548
Cor verdadeira (uC)	NR	294	398
DQO (mg/L)	261	150	186
DBO (mg/L)	NR	3,0	5,0
ST (mg/L)	1083	1165	1275
SST (mg/L)	34	8	37
pH	7,3	7,9	7,4
Temperatura (°C)	25,8	26,8	24,2
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	3,5	<0,1	<0,1
Fósforo (mg/L)	0,45	<0,1	<0,1
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	NR	5,5	4,18
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	44	74	52

*NR: não realizado

5.1.2 Ensaio 01: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante, sem adição de polímero e com variação do gradiente de velocidade de mistura lenta

O principal objetivo do ensaio 01 era verificar se o coagulante usado individualmente seria eficiente no tratamento do efluente, verificar as dosagens mais eficientes e testar dois gradientes de velocidade para a mistura lenta (Gf). As configurações do ensaio 01 e os resultados de turbidez, cor aparente e DQO residual após o tratamento são demonstrados na tabela 5.2 a partir da qual foram construídas as figuras 5.1 e 5.2.

Tabela 5.2: Configurações do ensaio 01 e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	Gf (s ⁻¹)	pH	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uC)			DQO (mg/L)		
				2 min	4 min	6 min	2 min	4 min	6 min	2 min	4 min	6 min
1	40	40	7,1	34,2	30,1	30,8	576	428	554	256	254	245
2	60		7,1	34,1	27,8	25,6	580	464	449	248	234	251
3	80		7	39	27,3	29,2	556	430	431	342	244	226
4	100		6,8	30,4	23,3	24,5	454	382	385	213	221	217
5	40	80	7,2	38,1	36,3	36,3	590	556	404	275	228	273
6	60		7,2	35,7	28,9	25,9	568	506	406	245	228	258
7	80		6,9	43,9	23,3	19,1	638	363	297	252	196	161
8	100		6,8	40,7	19,5	14,9	590	289	243	233	192	185

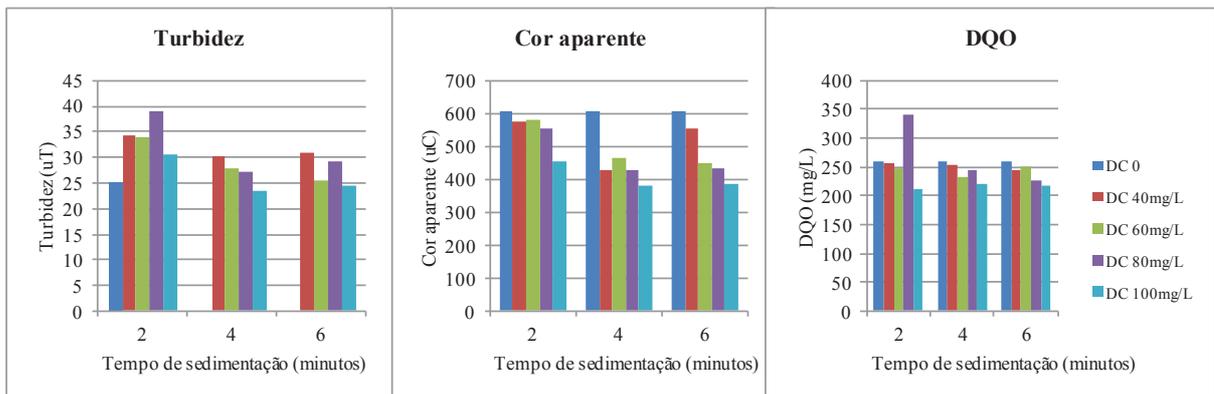


Figura 5.1: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos nos jarros numerados de 01 a 04

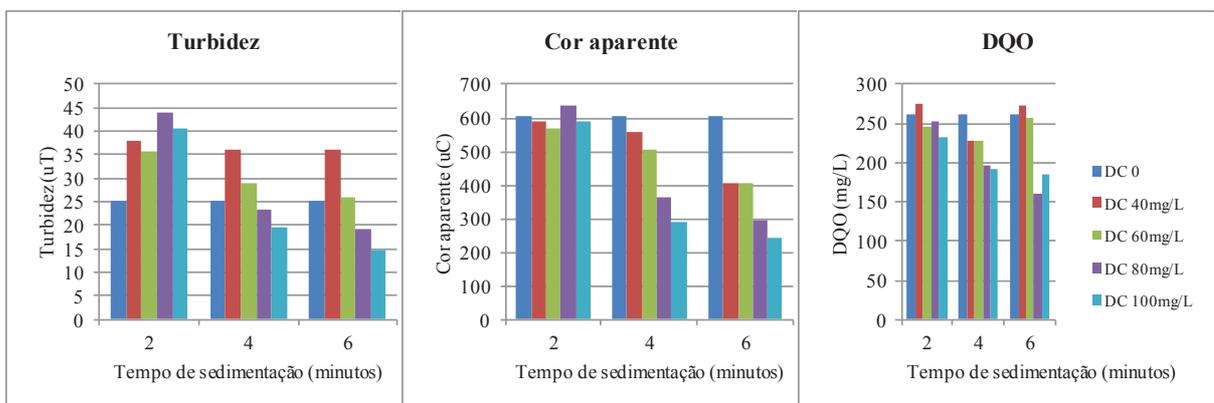


Figura 5.2: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos nos jarros numerados de 05 a 08

Para avaliar o êxito do tratamento empregado foram analisadas as eficiências de

remoção de turbidez, cor e DQO. Na figura 5.3 são apresentadas as eficiências de remoção dos parâmetros analisados.

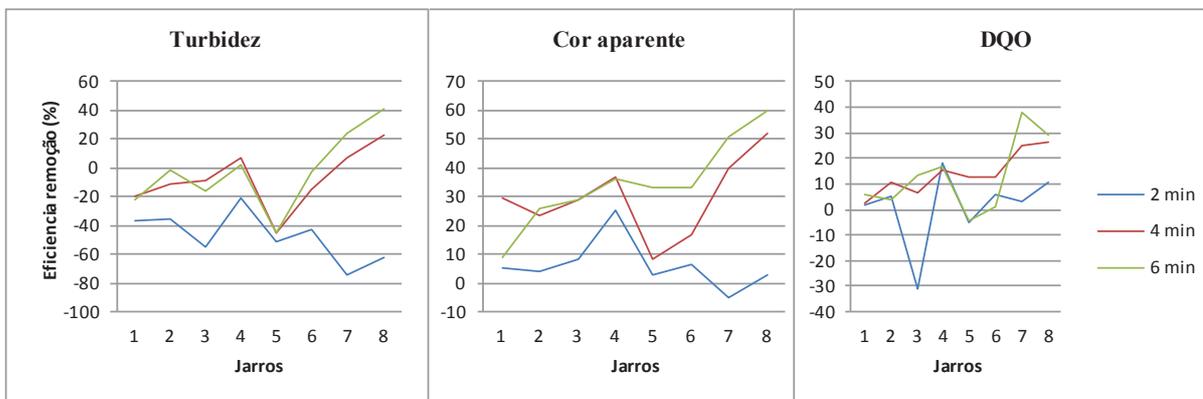


Figura 5.3: Resultados das eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 01

Nota-se que para os três parâmetros analisados o tempo de sedimentação de 2 minutos não se mostrou eficiente. Logo, a partir desse ensaio descartou-se esse tempo de sedimentação. Em termos de remoção de turbidez, a máxima eficiência alcançada foi de 40,6% no jarro 08, sendo que nesse mesmo jarro foi observada a maior remoção de cor aparente, 59,9%, ambos para a coleta após 6 minutos de sedimentação. Em relação à DQO a melhor eficiência foi obtida no jarro 7, sendo esta de 38,7%. Também nesse caso o tempo de sedimentação foi de 6 minutos.

Como o tempo de sedimentação mais efetivo na remoção dos três parâmetros analisados foi o de 6 minutos, esse tempo foi escolhido para se analisar qual o gradiente de rotação de mistura lenta era o mais efetivo. Azevedo Netto (1987) indica algumas etapas que podem ser adotadas para otimização dos aspectos operacionais em ensaios de bancada com *jar-test*. Em suma, os autores indicam uma sequência de ensaios em que algumas condições sejam fixadas e outras variadas, permitindo com isso a conclusão sobre qual a melhor condição operacional.

A figura 5.4 mostra a diferença de eficiência de cada rotação para o tempo de sedimentação de 6 minutos variando a dosagem de coagulante.

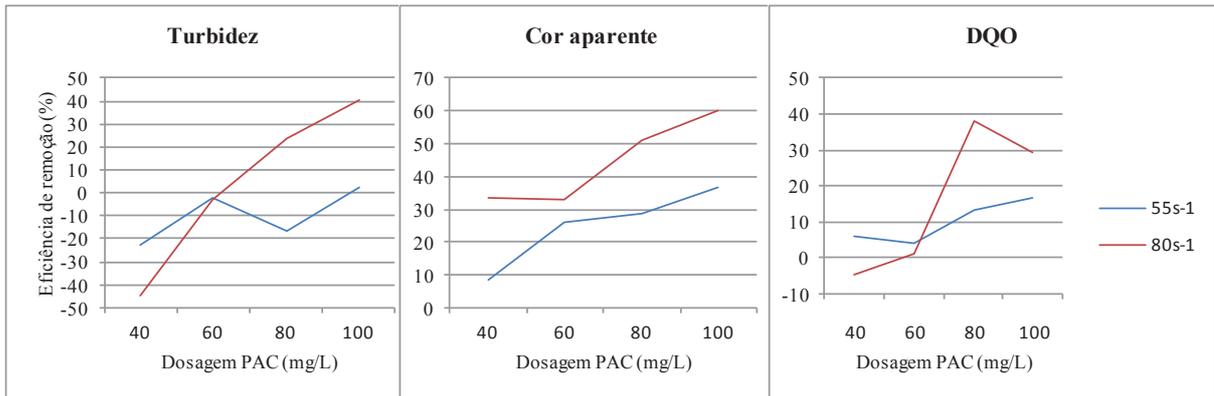


Figura 5.4: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 01, variando o gradiente de velocidade da mistura lenta

O maior gradiente de velocidade ($80s^{-1}$) foi o que apresentou maior eficiência nos três parâmetros analisados. Sendo assim, o mesmo foi fixado como condição de operação em todos os ensaios subsequentes. Azevedo Netto (1987) aponta que a escolha da melhor configuração operacional deve ser baseada de acordo com o aspecto do floco formado e da remoção de cor e turbidez na amostra de sobrenadante.

5.1.3 Ensaio 02: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e testando três polímeros como auxiliares de floculação

A partir da análise do primeiro ensaio foi possível observar que o coagulante utilizado individualmente não foi efetivo na remoção dos parâmetros analisados. Além disso, muitos autores indicam que o uso de polímeros como flocculantes proporciona aumento significativo na remoção de turbidez, cor e DQO (WONG et al, 2006; SENA, 2005; OENNING JUNIOR, 2006; AMOO e AMUDA, 2007; ZHONG et al, 2003; WALKER e KELLEY, 2003). Sendo assim, foram testados no ensaio 02 três polímeros auxiliares de floculação com objetivo de escolher o melhor polímero a ser usado durante os próximos ensaios em função da eficiência apresentada pelos mesmos. Os resultados estão organizados nos itens subsequentes e foram denominados ensaio 02a, ensaio 02b e ensaio 02c.

Outra alternativa para melhorar a eficiência do tratamento por coagulação/floculação/sedimentação é a variação do pH de coagulação para valores ácidos e alcalinos, de modo que o coagulante apresente melhor desempenho na clarificação do efluente. No entanto, concomitantemente aos experimentos realizados nessa etapa preliminar,

Quartaroli (2012) testou a variação do pH natural do mesmo efluente utilizado nessa pesquisa para valores ácidos (5,0, 5,5 e 6,0) e alcalinos (7,5, 8,0 e 8,5), não encontrando grandes variações nos resultados de remoção de turbidez, cor e DQO por flotação, quando dessas mudanças, em relação ao uso do efluente com pH natural. O autor concluiu, portanto, que é melhor utilizar o pH natural do efluente, já que houve pouca variação nos resultados, reduzindo assim os gastos com reagente para correção de pH. Destaca-se que, previamente a flotação, há uma etapa de coagulação e floculação, nas quais foi possível observar, que os flocos formados pela ação do coagulante, nos ensaios com variação de pH, não tinham boas características para sedimentação, ou seja, eram fracos e muito pequenos.

5.1.3.1 Ensaio 02a: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico PRAESTOL 2540 como auxiliar de floculação

No ensaio 02a utilizou-se o polímero aniônico de alto peso molecular PRAESTOL 2540 como auxiliar de floculação. A faixa de operação de pH desse polímero, indicada pelo fabricante é entre 06 e 10. As configurações do ensaio e os resultados de turbidez, cor aparente e DQO residual estão apresentados na tabela 5.3 por meio da qual foi elaborada a figura 5.5.

Tabela 5.3: Configurações do ensaio 02a e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	pH	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uC)			DQO (mg/L)		
				4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min
1	100	1	7,1	27,9	25,9	22,3	407	365	364	134	138	119
2	100	2	7,1	9,4	9,2	9,9	217	225	229	90	87	102
3	100	3	7,13	7,8	6,4	7,7	205	205	220	95	89	90
4	150	1	7,04	3,5	3,4	3,8	144	136	137	77	75	71
5	150	2	6,98	3,2	3,8	3,8	125	122	131	59	62	61
6	150	3	6,97	4,9	1,5	1,7	137	103	106	65	67	63

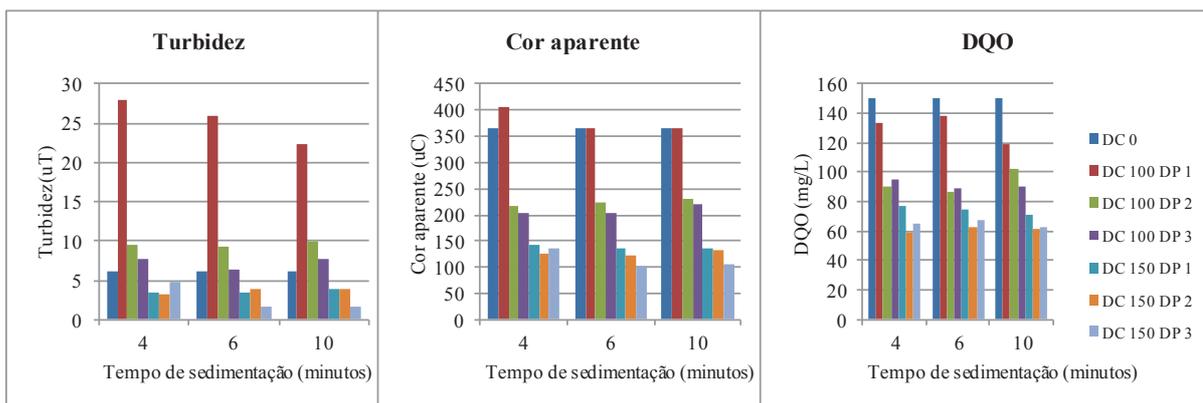


Figura 5.5: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO, obtidos no ensaio 02a

Para compreender melhor o efeito do tratamento empregado devem ser observadas as eficiências de remoção dos parâmetros, ou seja, quanto foi removido de turbidez, cor aparente e DQO em termos percentuais no sobrenadante em relação ao efluente bruto. Os resultados estão organizados em três séries, demonstradas na figura 5.6, sendo cada uma delas relativa ao tempo de sedimentação a partir do qual foi coletado o sobrenadante.

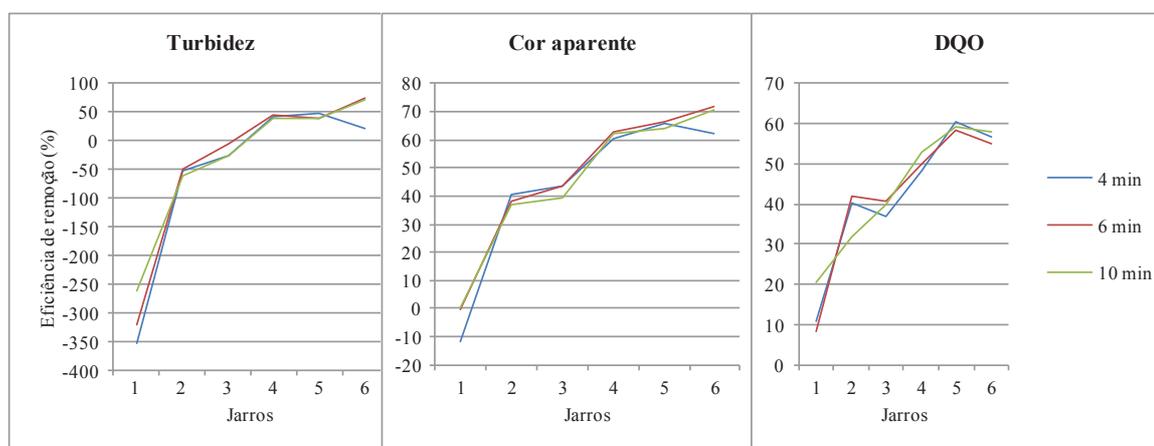


Figura 5.6: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 02a

Observou-se que as eficiências de remoção dos três parâmetros foram semelhantes nos três tempos de coleta e variaram bastante para as diferentes dosagens de coagulante ou polímero aplicadas (linhas próximas, com inclinação acentuada). Isso levou a intuir que o fator que mais influenciou na eficiência do tratamento foi a dosagem de coagulante e de polímero e não o tempo de sedimentação. A melhor eficiência obtida em termos de remoção de turbidez foi de 75,24% no jarro 06, para 06 minutos de sedimentação sendo que para 10 minutos de sedimentação foi obtida eficiência de 73,14%, muito próxima àquela obtida no tempo de sedimentação inferior. A configuração adotada no jarro 06 foi também a mais

eficiente em termos de remoção de cor aparente, alcançando-se 71,7% de eficiência para 06 minutos de sedimentação. Já a remoção de DQO foi mais eficiente no jarro 05, obtendo-se 60,63% de eficiência com 04 minutos de sedimentação.

5.1.3.2 Ensaio 02b: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação

No ensaio 02b usou-se o polímero aniônico de alto peso molecular PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação. A faixa de operação de pH desse polímero, indicada pelo fabricante é entre 01 e 08. As configurações do ensaio 02b e os resultados de turbidez, cor aparente e DQO residual são apresentados na tabela 5.4 por meio da qual foi elaborada a figura 5.7.

Tabela 5.4: Configurações do ensaio 02b e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	pH	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uC)			DQO (mg/L)		
				4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min
1	100	1	7,04	23,4	24,3	26,1	370	375	399	123	123	130
2	100	2	7,09	23,7	24,1	27,1	376	377	424	133	131	139
3	100	3	7,12	29,7	45	39,7	434	622	582	164	200	187
4	150	1	7	14,6	8,45	15,4	254	178	250	114	82	108
5	150	2	6,96	8,0	11,6	10,6	179	227	204	91	104	94
6	150	3	6,95	21,1	15,4	11,2	212	220	195	204	127	130

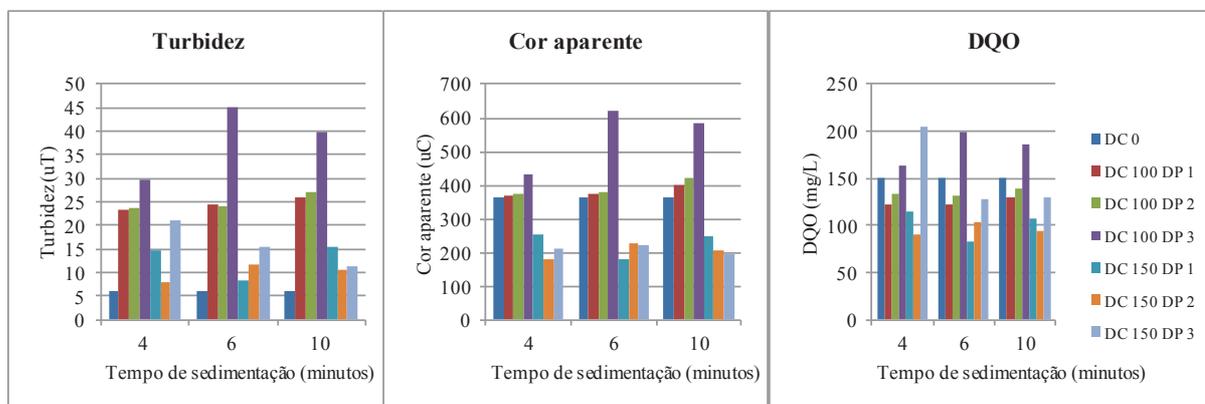


Figura 5.7: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 02b

O tratamento não proporcionou remoção turbidez, já que houve aumento do valor residual nas amostras de sobrenadante em relação ao efluente bruto. Houve remoção de cor aparente e de DQO. Os resultados percentuais são apresentados na figura 5.8.

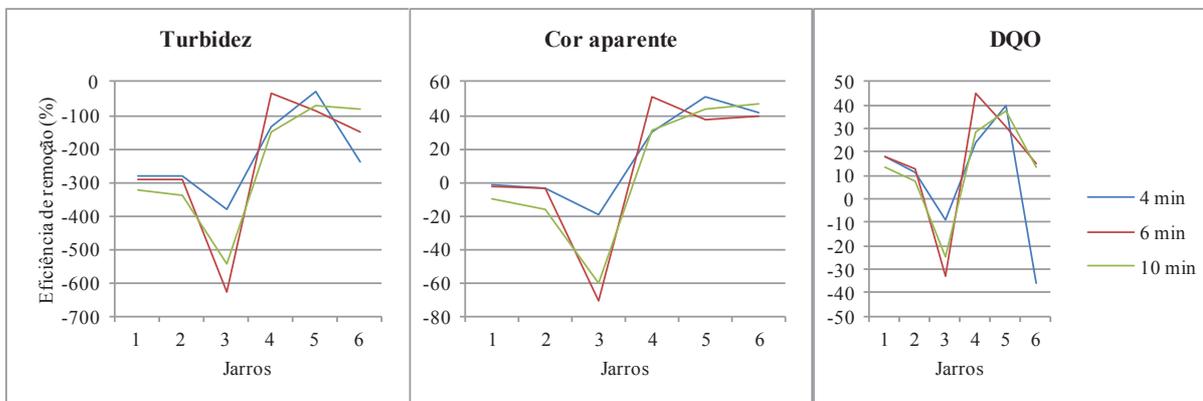


Figura 5.8: Resultado do aumento e turbidez e das remoções de cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 02b

Considerando a parte da figura que descreve a “remoção” de turbidez é possível perceber que foram resultados negativos para todas as configurações testadas, significando que, em relação ao bruto, houve aumento da turbidez no sobrenadante, ou seja, com a adição do coagulante e do polímero formavam-se os flocos, mas os mesmos não tinham massa suficiente para sedimentar e acabavam sendo coletados junto ao sobrenadante, de modo a conferir aumento de turbidez ao efluente.

Piveli e Kato (2006) destacam a dificuldade em tratar, por meio de coagulação e floculação, águas que apresentam baixa turbidez e cor elevada, que resultam na formação de flocos muito pequenos, de baixa velocidade de sedimentação.

Já a remoção de cor aparente ocorreu de fato a partir do jarro 04, quando a dosagem de coagulante passou de 100 para 150mg/L. A maior eficiência foi alcançada no jarro 04 sendo esta de 51,1% para 06 minutos de sedimentação. Observando somente a remoção de cor, nota-se que as dosagens de coagulante e polímero tiveram maior influência que a velocidade de sedimentação no êxito do tratamento. A maior remoção de DQO obtida foi 45,19%, também no jarro 04, com 06 minutos de coleta.

5.1.3.3 Ensaio 02c: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação

No ensaio 02c utilizou-se o polímero aniônico de alto peso molecular PRAESTOL 2510 como auxiliar de floculação. A faixa de operação de pH desse polímero, indicada pelo fabricante é entre 03 e 08. As configurações do ensaio 02c e os resultados de turbidez, cor aparente e DQO residual são apresentados na tabela 5.5 por meio da qual foi elaborada a figura 5.9.

Tabela 5.5: Configurações do ensaio 02c e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	pH	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uC)			DQO (mg/L)		
				4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min
1	100	1	7,07	21,4	25,4	24,8	359	376	374	121	137	120
2	100	2	7,05	18,4	19,4	20,2	326	319	330	106	112	100
3	100	3	7,07	23,0	19,1	21,7	382	336	358	140	111	116
4	150	1	7,02	9,52	7,53	8,13	230	197	201	96	94	87
5	150	2	6,95	4,72	2,75	3,77	165	137	142	70	66	59
6	150	3	6,95	13,3	4,81	5,16	188	153	142	81	62	63

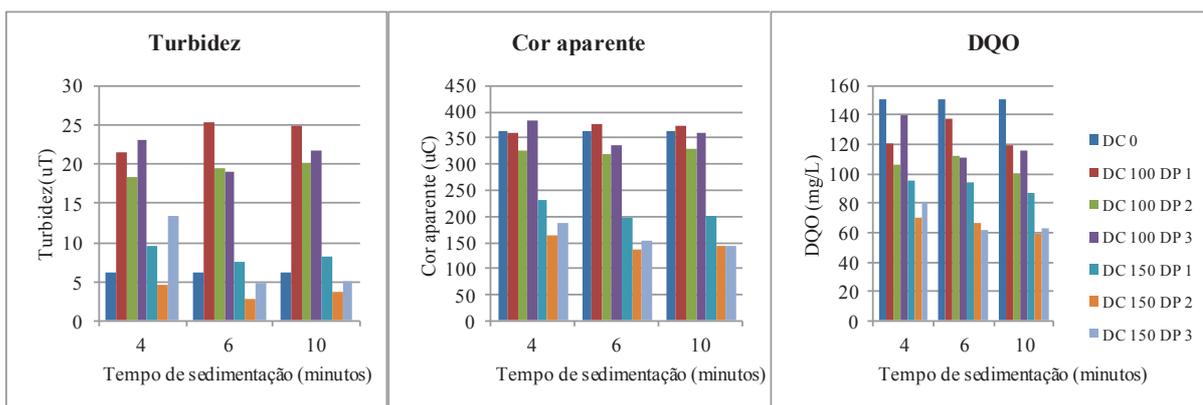


Figura 5.9: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 02c

Considera-se as eficiências de remoção dos três parâmetros, apresentados na figura 5.10, para discutir sobre o tratamento empregado no ensaio 02c.

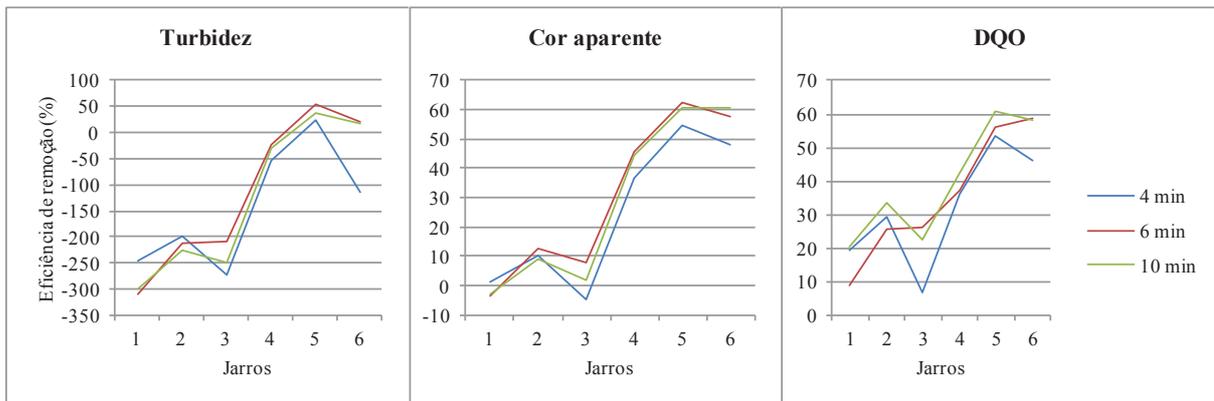


Figura 5.10: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, obtidas no ensaio 02c

Apesar de no ensaio 02c, em alguns jarros terem sido obtidas remoções de turbidez, para a maioria das configurações, similarmente ao que aconteceu no ensaio 02b, foi verificado aumento da turbidez no sobrenadante em relação ao efluente bruto. A máxima eficiência obtida foi de 55,5% no jarro 05, na amostra de sobrenadante coletada após 06 minutos de sedimentação. Quanto à remoção de cor, a máxima eficiência obtida foi de 60,9% nos jarros 05 e 06, ambos com 10 minutos de sedimentação. A remoção de DQO foi mais eficiente no jarro 05, apresentando 60,57% de remoção na amostra que foi mantida por 10 minutos em sedimentação. Para os três parâmetros analisados a variação das dosagens de coagulante e polímero foi mais significativa do que a variação da velocidade de sedimentação para o êxito do tratamento.

5.1.3.4 Escolha do melhor polímero

Comparando os ensaios 01 e 02 notou-se que quando houve emprego de polímero auxiliar de floculação houve também efetiva melhora na remoção de turbidez, cor aparente e DQO. O desempenho dos floculantes na floculação é função do tipo de floculante, seu peso molecular, conteúdo e natureza iônica (QIAN et al, 2004). Para decidir a respeito de qual o melhor polímero entre os três testados no ensaio 02 foi feita a análise das eficiências de remoção alcançadas pelos mesmos em relação aos três parâmetros analisados.

As eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO dos três polímeros foram comparadas para auxiliar na decisão a respeito de qual o melhor polímero. Como a velocidade de sedimentação não influenciou no tratamento tanto quanto as dosagens de coagulante e polímero, para facilitar a análise e compreensão dos resultados obtidos pelos três polímeros

em conjunto, consideraram-se somente os resultados para o tempo de 06 minutos de sedimentação. Outra simplificação adotada nessa análise foi considerar apenas os jarros em que foi utilizado 150mg/L de PAC, excluindo a dosagem inferior de 100mg/L já que esta foi menos eficiente. Os polímeros foram numerados em 01, 02 e 03 conforme a ordem apresentada nos itens anteriores. Na figura 5.11 estão apresentados os resultados de remoção de turbidez, cor aparente e DQO dos três polímeros estudados, variando as dosagens do mesmo, aplicados juntamente com a dosagem de 150mg/L de PAC.

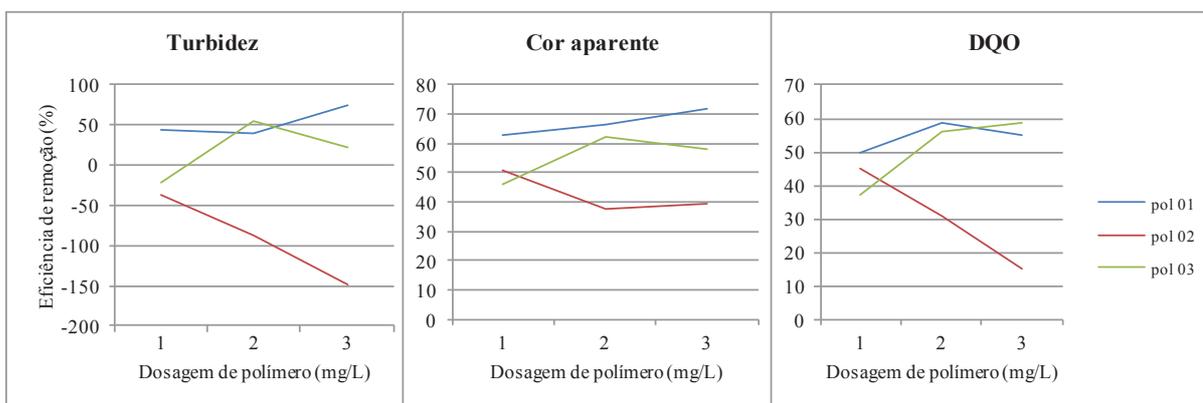


Figura 5.11: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO, utilizando 150mg/L de PAC, variando os tipos e as dosagens de polímero empregado

A figura 5.11 permite concluir que o polímero 01 (PRAESTOL 2540, pH 06 a 10) foi mais eficiente que os demais analisados na remoção de cor aparente em todas as dosagens empregadas e contribuiu também para a maior eficiência de remoção de turbidez e DQO, na menor dosagem testada, 1mg/L, em relação aos demais. A partir dessa análise, adotou-se o polímero 01 como auxiliar de floculação em todos os ensaios posteriores.

5.1.4 Ensaio 03: ensaio preliminar de coagulação/floculação/sedimentação empregando PAC como coagulante e polímero aniônico como auxiliar de floculação

O ensaio 03 foi feito com o polímero PRAESTOL 2540 (pH 06 a 10) como auxiliar de floculação. As configurações do ensaio 03 e os resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO são apresentados na tabela 5.6 por meio da qual foi elaborada a figura 5.12.

Tabela 5.6: Configurações do ensaio 03 e residuais de turbidez, cor aparente e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uC)			DQO (mg/L)		
			4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min	4 min	6 min	10 min
1	100	1	35,8	22,4	22,9	576	396	390	128	152	136
2	100	2	3,7	3,3	4,5	148	146	147	84	87	81
3	100	3	10,2	10,4	10,2	228	249	223	86	108	96
4	150	1	2,7	3,2	1,0	134	129	126	83	72	81
5	150	2	4,7	3,2	3,2	159	149	121	81	73	66
6	150	3	4,3	3,7	3,8	206	220	267	115	113	80
7	200	1	24,5	11,3	8,5	188	157	159	63	52	59
8	200	2	1,2	0,8	0,9	72	68	65	62	52	55
9	200	3	4,0	11,2	6,6	110	91	121	49	56	103

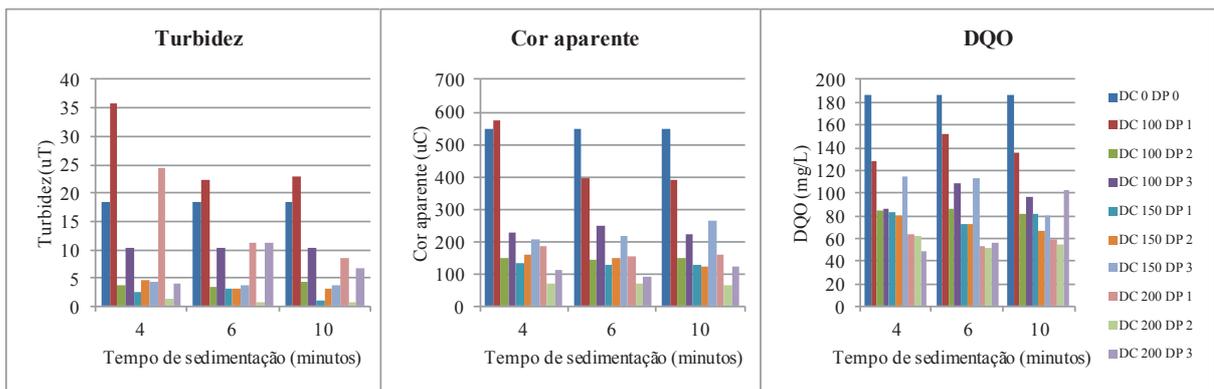


Figura 5.12: Resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e DQO obtidos no ensaio 03

Em termos percentuais, ou seja, as eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e DQO, são demonstradas nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15, respectivamente.

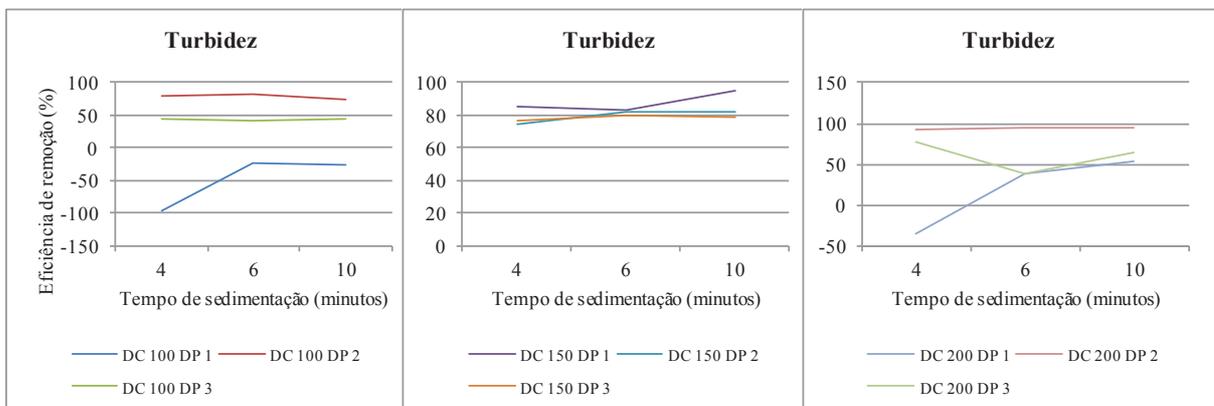


Figura 5.13: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 03

Os melhores resultados para remoção de turbidez foram obtidos para a dosagem de PAC igual a 200mg/L e 2 mg/L de polímero, sendo que nessa configuração os três tempos de sedimentação empregados apresentaram eficiências parecidas ou seja: 93,28% de remoção na amostra coletada após 4 minutos de sedimentação, 95,46% de remoção na amostra coletada após 6 minutos e 95,19% de remoção na amostra coletada após 10 minutos. Algumas outras configurações também tiveram essa característica, é o caso dos jarros em que se empregaram 100mg/L de PAC com 2 e 3mg/L de polímero. Nesses dois casos não foram observadas variações significativas entre os diferentes tempos de sedimentação. O mesmo ocorreu quando foram empregadas três diferentes dosagens de polímero combinadas com 150mg/L de PAC. Isso reafirma o que já tinha sido observado nos ensaios anteriores, em que as dosagens de coagulante e polímero influenciaram muito mais na eficiência do tratamento do que as velocidades de sedimentação.

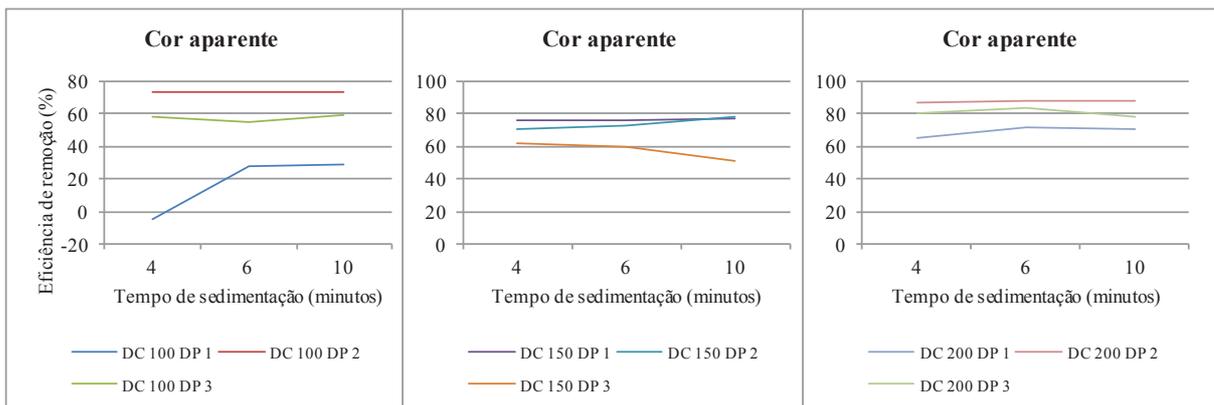


Figura 5.14: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 03

A remoção de cor também foi mais eficiente na configuração do jarro em que foi dosado 200mg/L de PAC e 2mg/L de polímero, sendo obtidos 86,86% de remoção de cor na amostra coletada após 4 minutos, 87,59% após 6 minutos e 88,14% após 10 minutos de sedimentação, mantendo a tese de que o tempo de sedimentação não teve influência significativa na eficiência do tratamento. Ao longo dos ensaios observou-se que os flocos formados eram grandes e sedimentavam com facilidade. Havia sedimentação desses flocos em breve espaço de tempo, indicando que não haveria necessidade de emprego do maior tempo de sedimentação.

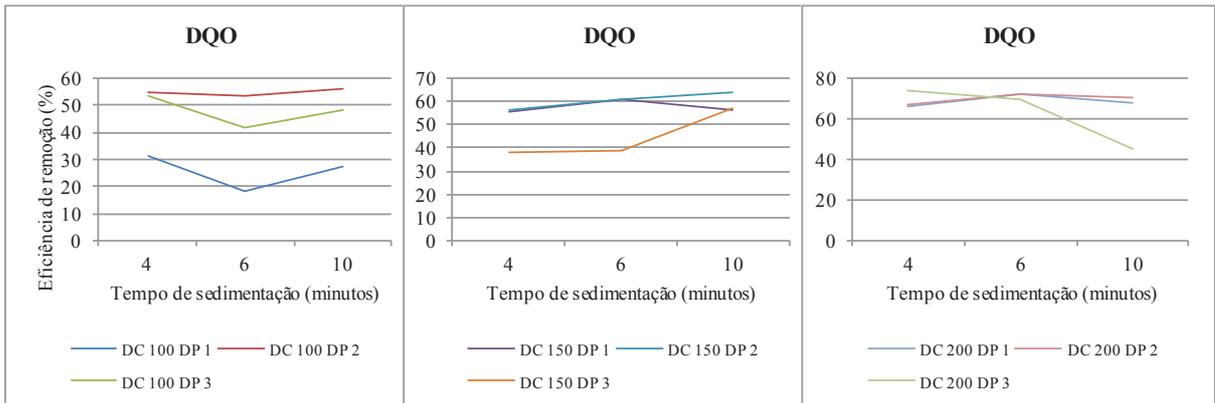


Figura 5.15: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 03

Em termos de remoção de DQO, nos jarros em que foi dosado 200mg/L de PAC houve remoção parecida desse parâmetro em todas as dosagens de polímero e tempos de sedimentação testados, com exceção da amostra coletada após 10 minutos do jarro com 3mg/L de polímero em que foi obtida queda da eficiência de remoção 73,53% para 44,79% entre a coleta com 4 minutos e com 10 minutos e que não foi possível de se explicar.

Observando-se as três figuras em conjunto, percebeu-se que quando uma configuração foi eficiente na remoção de um determinado parâmetro, turbidez, por exemplo, essa eficiência repetiu-se nos outros dois. Isso mostra que o tratamento capaz de remover sólidos em suspensão, responsáveis por conferir turbidez, também é capaz de remover sólidos dissolvidos, responsáveis por conferir cor e isso causa consequente remoção de DQO. Uma representação disso é demonstrada na figura 5.16, onde foram agrupados os resultados de remoção do jarro 08, no qual foi dosado 200mg/L de PAC com 2mg/L de polímero.

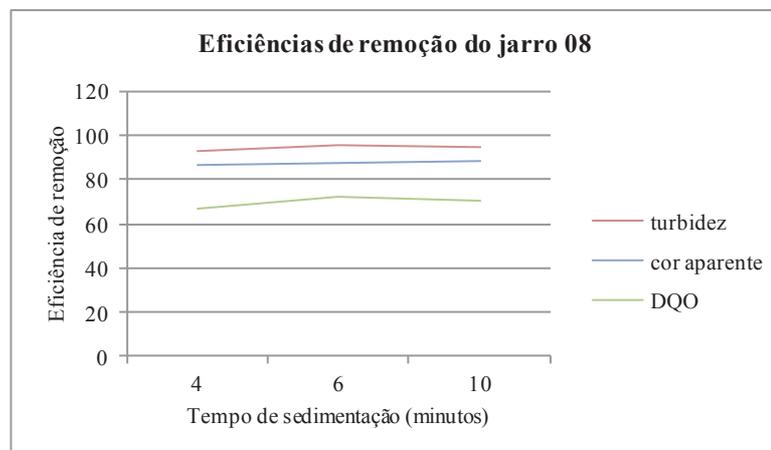


Figura 5.16: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente e DQO obtidas no jarro número 08 do ensaio 03

5.2 Resultados da segunda etapa: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação

A segunda etapa foi dividida em duas fases. O objetivo da primeira fase foi avaliar a eficiência do coagulante utilizado individualmente e combinado com polímero, além de testar diversas dosagens de coagulante combinadas com diferentes dosagens de polímero. Foram mantidos os ensaios sem polímero de modo que servissem como testemunha do tratamento, ou seja, comprovando se a inserção do polímero era de fato efetiva para o tratamento. Além disso, foi possível confirmar se o tratamento era eficaz mesmo com as variações do efluente bruto, provocadas, por exemplo, por alterações no processo produtivo industrial, ou seja, se o tratamento é capaz de suportar tais variações.

Já o objetivo da segunda fase foi tentar diminuir o tempo de mistura lenta de 10 para 07 e 05 minutos e avaliar o efeito dessa mudança nas respostas do tratamento empregado.

5.2.1 Resultados da primeira fase: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação, utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens do polímero aniônico como auxiliar de floculação

5.2.1.1 Caracterização do efluente da primeira fase da segunda etapa

Da mesma forma que na etapa 01 o efluente foi caracterizado antes de passar pelo tratamento. Na tabela 5.7 são apresentados os parâmetros monitorados nas coletas (numeradas de 04 a 06) realizadas durante a segunda etapa. As variações observadas a cada coleta são resultado não só da complexa mistura de efluentes de toda indústria, mas também dos diferentes tipos de papel que são produzidos a cada período, utilizando todas as máquinas ou só parte delas, mais ou menos produtos químicos, entre outros aspectos que podem mudar temporalmente e que refletem nas características do efluente no final da estação.

Tabela 5.7: Caracterização do efluente nos ensaios da primeira fase da segunda etapa

Parâmetro	Ensaio 04	Ensaio 05	Ensaio 06
Turbidez (uT)	611	69,4	52,6
Cor aparente (uC)	2320	1870	1770
Cor verdadeira (uC)	1260	1160	1615
DQO (mg/L)	484	373	518
DBO (mg/L)	28	12	17
ST (mg/L)	1520	1519	1856
SST (mg/L)	122	95	35
pH	7,4	7,5	7,4
Temperatura (°C)	23,1	21,8	20,8
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1
Fósforo (mg/L)	0,4	0,18	0,26
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	3,71	4,2	3,83
Alcalinidade (mg/L)	89	92	103

De acordo com os dados apresentados na tabela 5.7 foi possível observar grande variação em termos de turbidez e cor aparente entre o ensaio 04 e os ensaios 05 e 06. Esse fato pode ser decorrente de alguma falha na operação da estação ou então de alguma alteração na produção da indústria nesse período. Esse fato reforça a importância da caracterização prévia do efluente a cada coleta e também o fato de serem feitas várias coletas no decorrer de um longo período, sempre testando diversas configurações do tratamento de modo a se verificar a eficácia do mesmo frente às variações observadas.

5.2.1.2 Ensaio 04: ensaio de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens do polímero aniônico como auxiliar de floculação

O principal objetivo do ensaio 04 foi testar a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO aplicando PAC como coagulante associado a um polímero aniônico auxiliar de floculação. As configurações do ensaio 04 e os resultados dos residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO são apresentados na tabela 5.8 por meio da qual foram elaboradas as figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20, respectivamente.

Tabela 5.8: Configurações do ensaio 04 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	50	0	509,0	2390	1440	NR
2	50	1	214,0	2190	1270	NR
3	50	2	89,1	1700	1290	NR
4	50	3	84,0	1870	1270	NR
5	100	0	733,0	2940	2490	NR
6	100	1	85,0	1920	1710	NR
7	100	2	96,0	1870	1170	NR
8	100	3	37,9	1090	850	293
9	125	0	522,0	2680	1570	NR
10	125	1	42,2	1180	960	338
11	125	2	56,7	1410	920	NR
12	125	3	30,8	850	730	265
13	150	0	199,0	1930	1240	NR
14	150	1	43,4	960	700	NR
15	150	2	39,6	880	770	260
16	150	3	17,5	440	410	209
17	175	0	82,4	1430	990	NR
18	175	1	38,8	740	630	172
19	175	2	10,2	270	260	177
20	175	3	4,5	225	220	175
21	200	0	72,7	1250	236	NR
22	200	1	3,1	191	189	166
23	200	2	2,3	194	192	152
24	200	3	2,7	196	192	173
25	250	0	88,9	1600	190	NR
26	250	1	3,1	174	173	146
27	250	2	2,1	154	153	138
28	250	3	4,5	185	174	148

*NR: não realizado

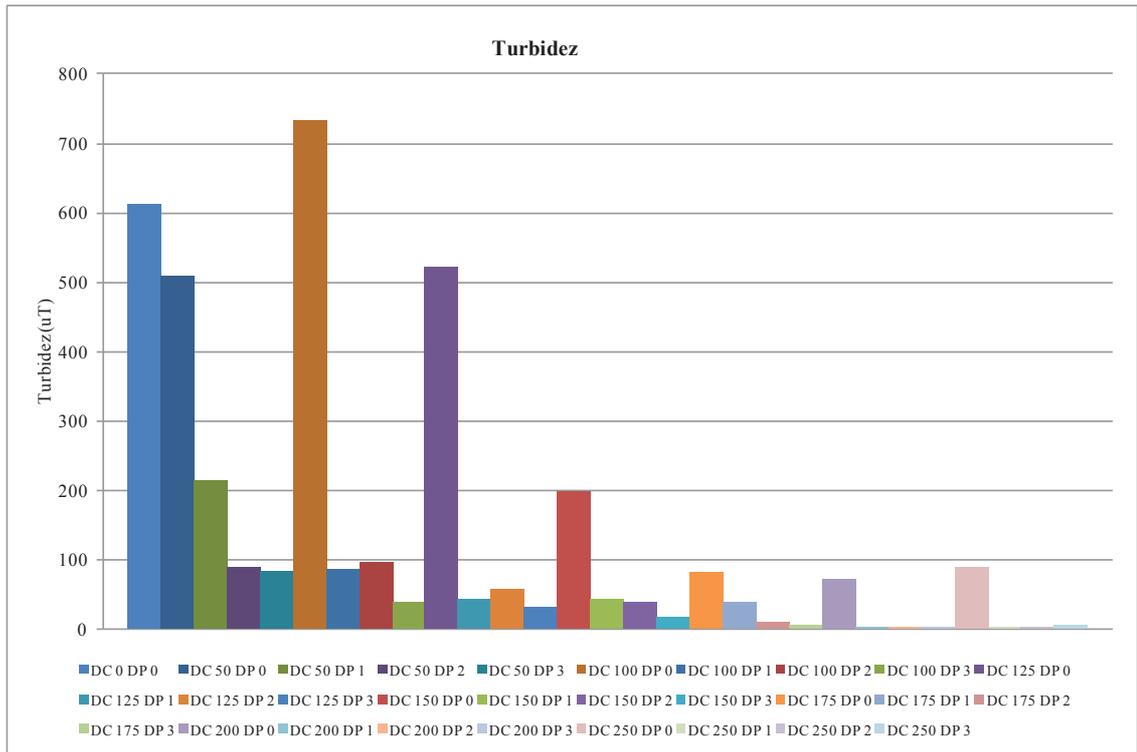


Figura 5.17: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 04

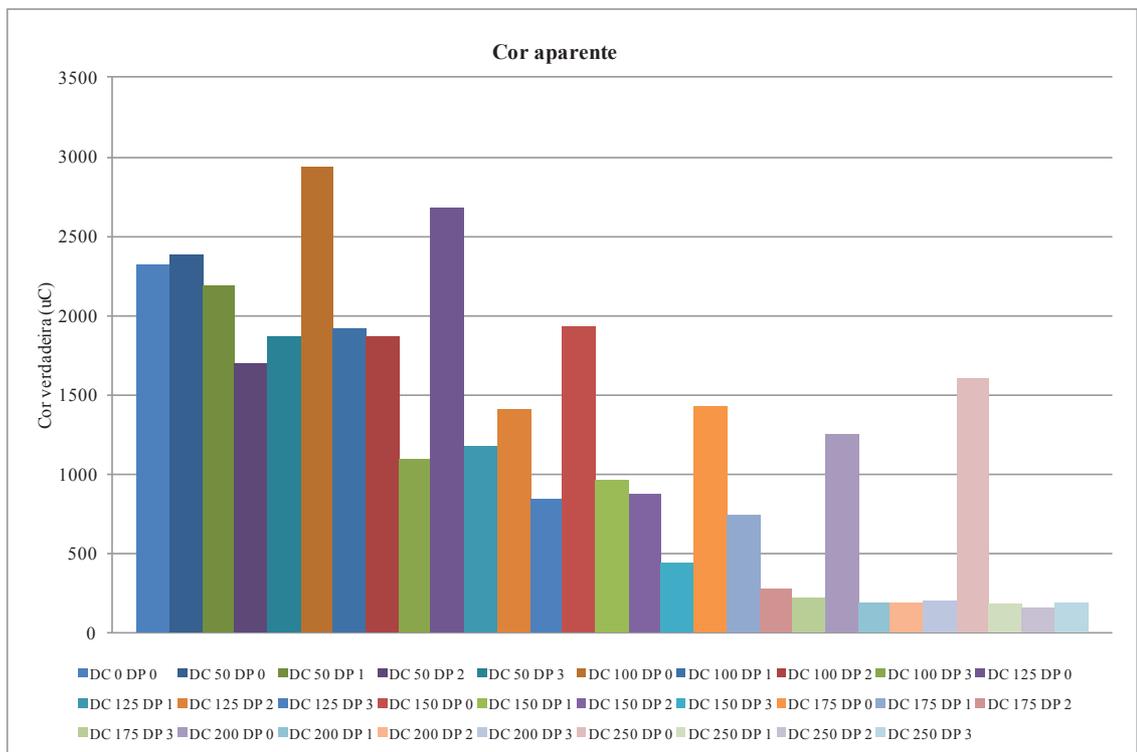


Figura 5.18: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 04

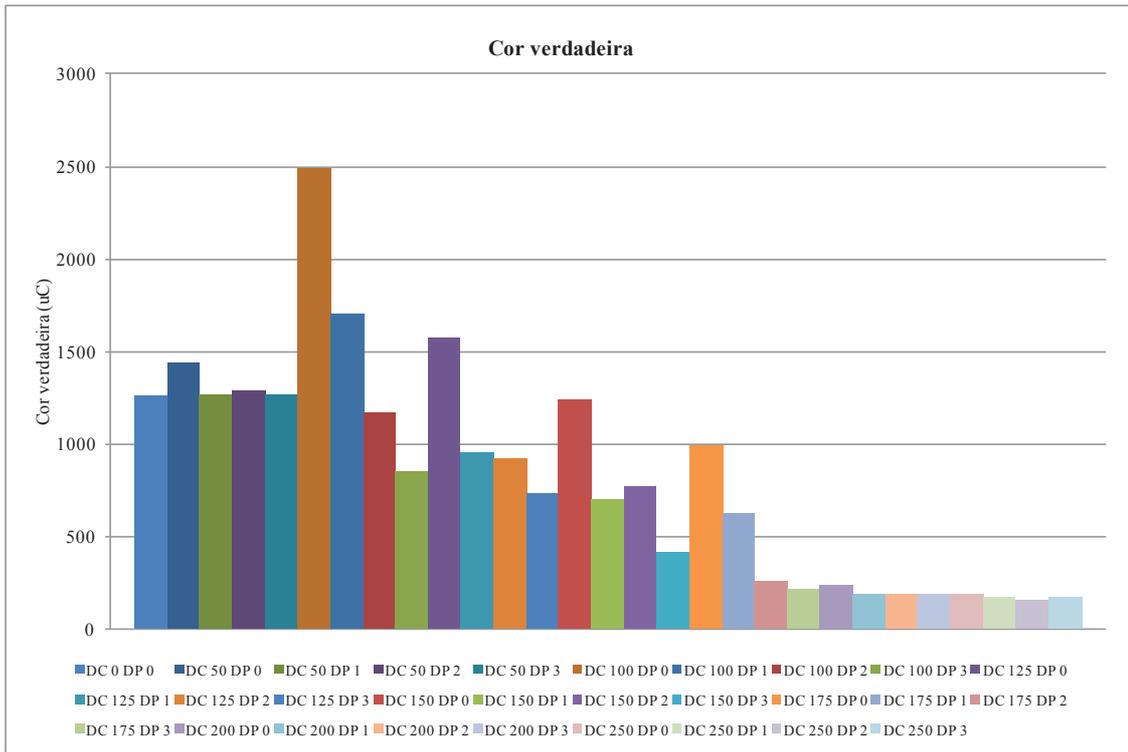


Figura 5.19: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 04

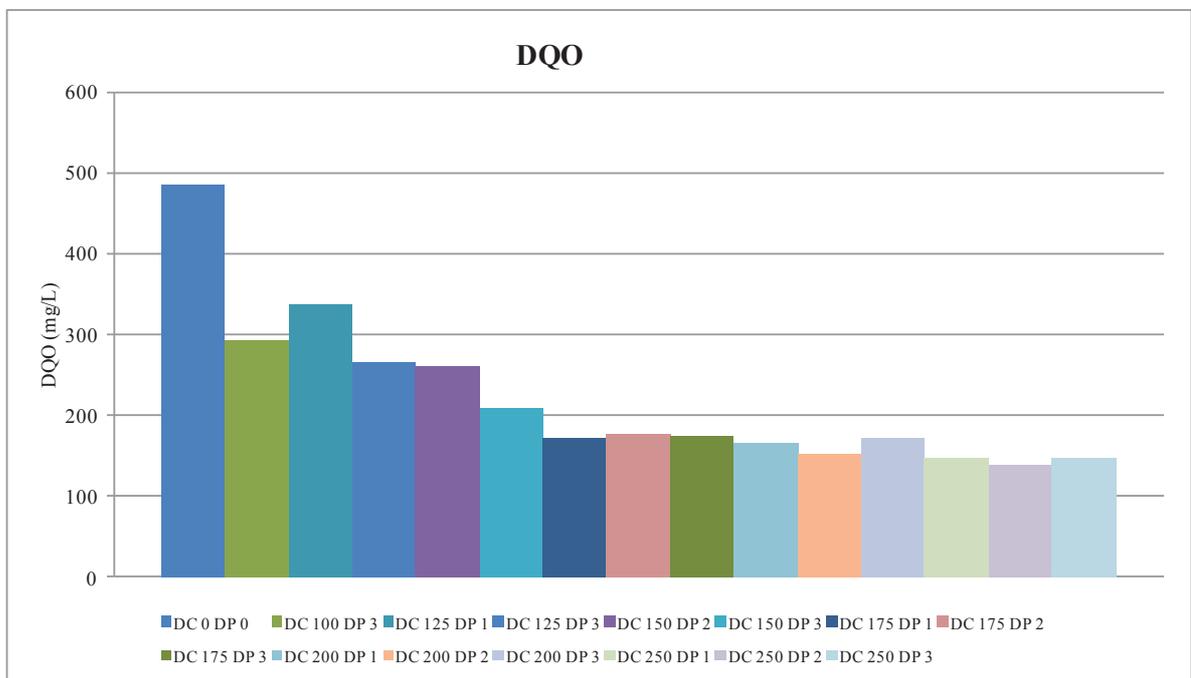


Figura 5.20: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 04

Para facilitar a compreensão sobre o efeito do tratamento empregado devem ser observados os resultados das remoções dos parâmetros de interesse. Nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23, respectivamente, são apresentados os resultados de remoção de turbidez, cor aparente e

verdadeira, organizados em séries em função das dosagens de coagulante.

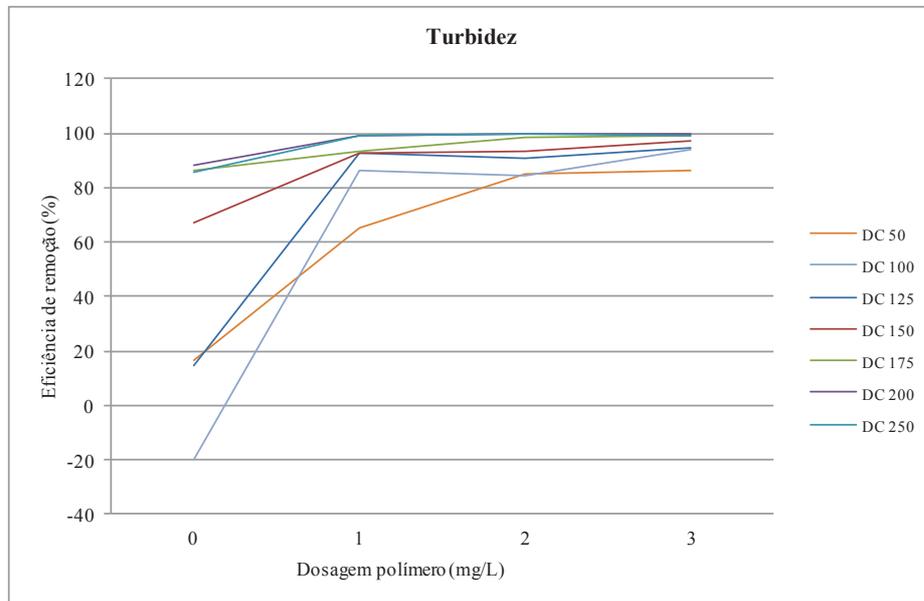


Figura 5.21: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 04

O tratamento empregado proporcionou efetiva remoção de turbidez chegando a valores próximos de 100% de remoção. Todas as dosagens de polímero combinadas com 200 e 250mg/L de PAC obtiveram mais de 99% de eficiência. Em todas as dosagens de coagulante testadas houve significativa melhora da remoção entre a configuração sem e com polímero. Em comparação com os ensaios anteriores, esse foi o que se obteve os melhores resultados de remoção de turbidez, no entanto, o residual de turbidez foi semelhante ao encontrado nos demais ensaios. Isso se deve ao fato de que nesse ensaio, a turbidez do efluente bruto era muito mais elevada do que a encontrada nos demais ensaios. Logo, em termos percentuais a remoção mostra-se maior. Analisando somente os valores do residual, há similaridade entre os resultados dos ensaios 03 e 04 para dosagem de 200mg/L de PAC com adição de polímero.

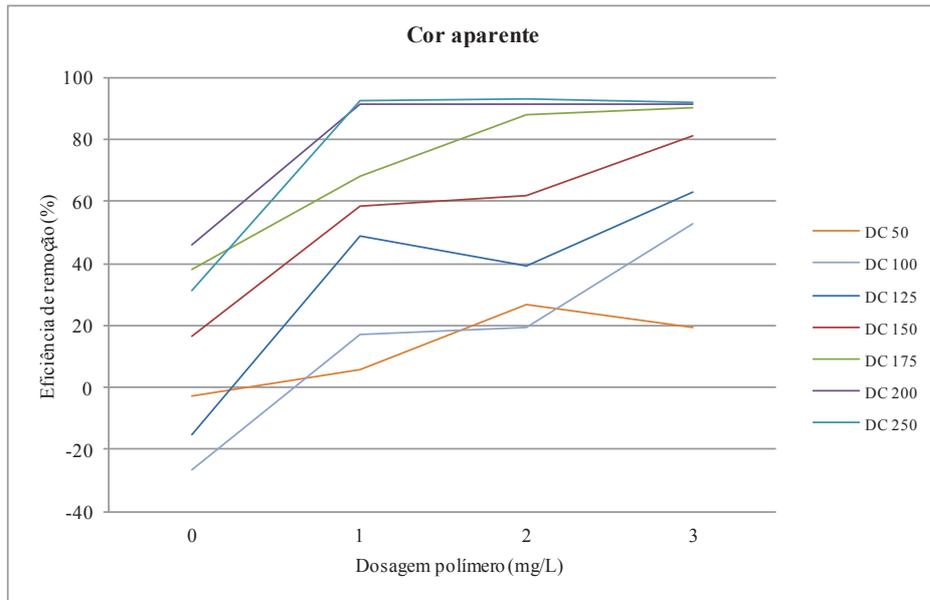


Figura 5.22: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 04

Observando a remoção de cor aparente fica ainda mais clara a influência do uso do polímero na melhora do tratamento. Os melhores resultados de remoção, semelhantemente ao encontrado para remoção de turbidez, estão nas configurações em que foram dosados 200 e 250mg/L de PAC com adição de polímero, sendo 93,36% a maior remoção para o jarro que foi dosado 250mg/L de PAC com 2mg/L de polímero.

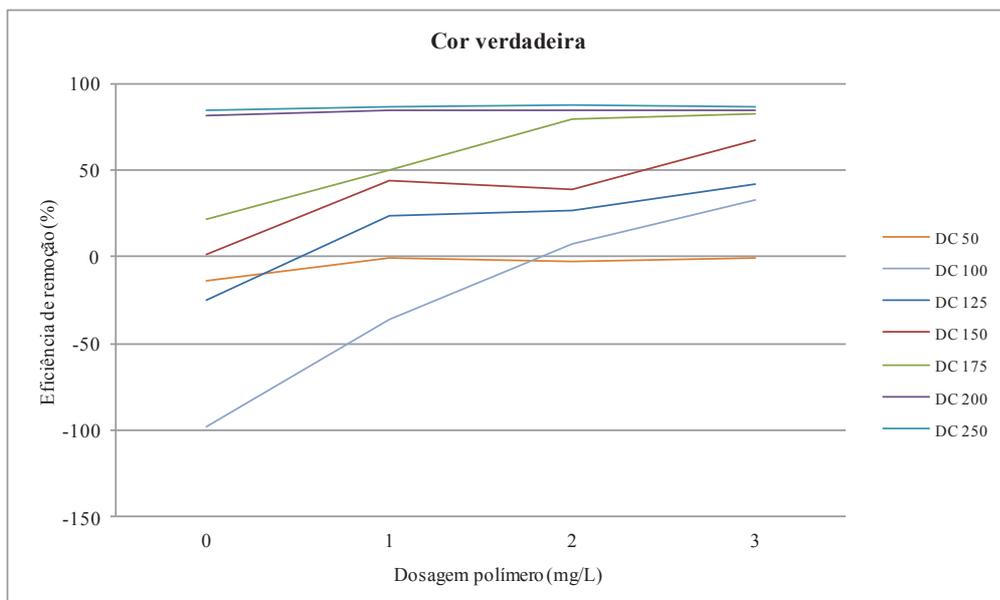


Figura 5.23: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 04

Em relação à remoção de cor verdadeira, para as dosagens de 200 e 250mg/L de PAC,

tanto com como sem polímero houve mais de 80% de eficiência remoção. É curioso o fato de que, comparando as remoções de cor aparente e verdadeira, para essas dosagens de coagulante, nos jarros em que não houve adição de polímero, houve um acréscimo de 46,12% de remoção de cor aparente para 81,27% de remoção de cor verdadeira para 200mg/L de PAC e de 31,03% de remoção de cor aparente para 84,12% de remoção de cor verdadeira para 250mg/L de PAC. A explicação para esse fato encontra-se na remoção de turbidez, que foi bem menor nos jarros sem polímero em relação aos jarros com polímero. Sendo assim, a turbidez remanescente desses jarros acabou por conferir cor aparente à amostra. No entanto, quando a mesma é submetida à centrifugação, para posterior leitura de cor verdadeira, há remoção dos sólidos suspensos, logo a remoção de cor verdadeira mostra-se muito maior que a remoção de cor aparente.

A DQO residual foi calculada somente nas amostras coletadas dos jarros em que houve boa remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira. Nesse sentido, os resultados de remoção de DQO estão apresentados na figura 5.24 onde se observa a remoção por jarro, conforme numeração apresentada na tabela 5.8.

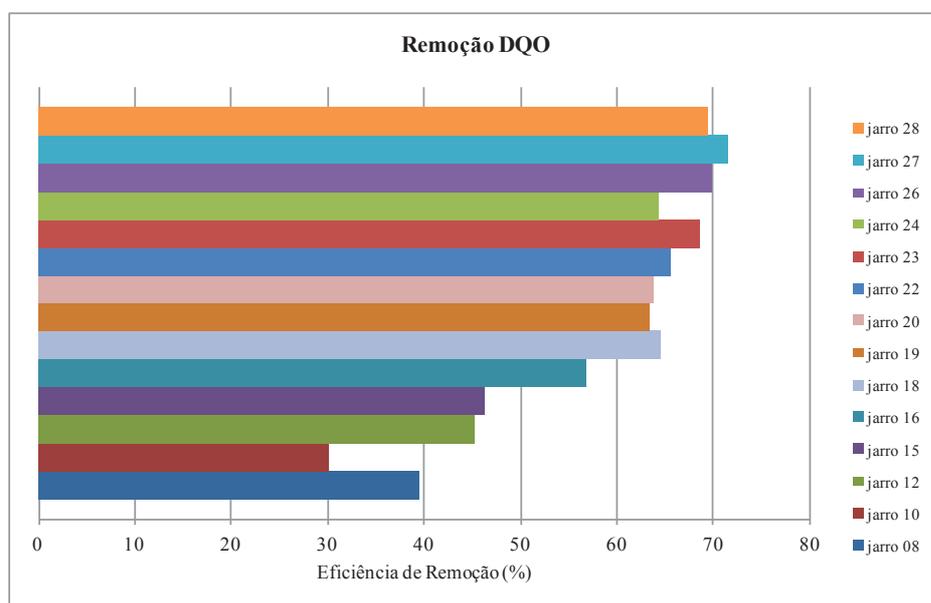


Figura 5.24: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 04

A maior remoção de DQO foi observada no jarro 27, em que foi dosado 250mg/L de PAC com 2mg/L de polímero, sendo 71,49% de eficiência. Nos demais jarros da série de 250mg/L de PAC foram obtidas eficiências de remoção parecidas: 69,84% para 1mg/L de polímero (jarro 26) e 69,42% para 3mg/L de polímero (jarro 28).

Observando os resultados de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO observou-se maior dificuldade em remover DQO do que os demais parâmetros. Enquanto a remoção de turbidez apresentou valores superiores a 99% e a remoção de cor aparente e verdadeira apresentaram valores superiores a 90%, a remoção de DQO foi levemente superior a 70% somente em uma configuração. Essa mesma dificuldade foi observada por Santos (2001) nos ensaios preliminares de coagulação/floculação/sedimentação da sua pesquisa. O autor verificou nesses ensaios, utilizando cloreto férrico como coagulante e efluente sanitário, remoção de mais de 99% de turbidez, sendo que essa eficiência de remoção aumentava proporcionalmente ao aumento da dosagem de coagulante e à diminuição da velocidade de sedimentação, enquanto as remoções de DQO pareciam ter um limite de 85%, ou seja, mesmo com aumento da dosagem de coagulante e diminuição da velocidade de sedimentação, a remoção não ultrapassava esse valor.

5.2.1.3 Produção e características de sedimentabilidade do lodo

O tratamento físico-químico produz lodo que deve ser tratado e disposto posteriormente. Esse lodo é devido aos sólidos em suspensão e dissolvidos retirados por meio do tratamento empregado. De acordo com Ahmad *et al.* (2008) e FERREIRA FILHO e WAELKENS (2009), em geral, a quantidade e as características do lodo produzido durante o processo de coagulação/floculação depende do coagulante utilizado e das condições operacionais e uma boa forma de estudar o volume e a sedimentabilidade do lodo é por meio da estimativa do IVL.

Jordão *et al* (1997) apresentam que, por definição e conceito, o IVL é o volume em mililitros ocupado por 01 grama de lodo, após sedimentação de 30 minutos. Nessa pesquisa foi estimado o IVL para cada configuração de ensaio estudada (tabela 5.8). Os resultados desse índice estão apresentados na figura 5.25.

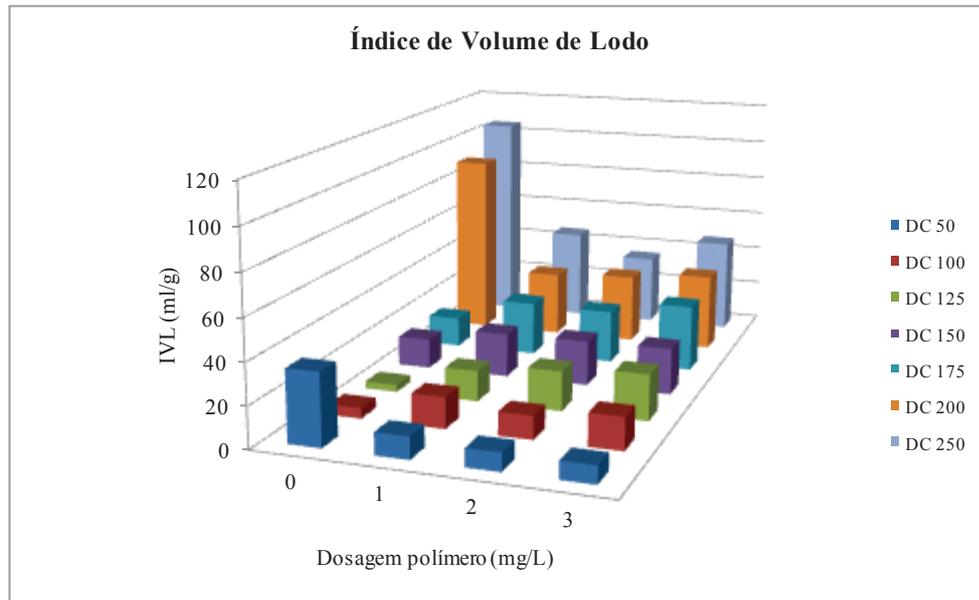


Figura 5.25: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 04

Von Sperling (2001) apresenta cinco faixas de sedimentabilidade e organiza os valores de IVL em intervalos que representam essas faixas. Sendo assim, os lodos são classificados de acordo com sua sedimentabilidade em ótima, boa, média, ruim ou péssima. Esses dados estão sintetizados na tabela 5.9.

Tabela 5.9: Faixa e valores típicos de IVL para as cinco faixas de sedimentabilidade

Sedimentabilidade	Faixa de valores do índice volumétrico de lodo – IVL	
	Faixa	Típico
Ótima	0 – 50	45
Boa	50 – 100	75
Média	100 – 200	150
Ruim	200 – 300	250
Péssima	300 – 400	350

Fonte: VON SPERLING (2001)

Para discussão dos valores de IVL foi necessário retomar os resultados de eficiência de remoção dos parâmetros analisados para as diversas dosagens testadas, já que há relevância das características de sedimentabilidade do lodo somente quando o tratamento é eficiente na remoção de turbidez, cor e DQO. Nas configurações em que não houve efetiva remoção de turbidez, cor e DQO também não houve formação de lodo. Nesses casos o índice IVL

apresenta valores baixos, mas isso não indica lodo de boa qualidade e sim ausência de lodo. Sendo assim, consideraram-se os valores de IVL para as dosagens de 200 e 250mg/L de PAC para discussão, já que foram os que apresentaram melhores resultados. Fica evidente a influência da adição de polímero na sedimentabilidade do lodo já que o IVL passa de 90,9 para 32,27mL/g e de 105,3 para 45,6mL/g entre as amostras sem polímero e com 1mg/L de polímero para as doses de 200 e 250mg/L de PAC respectivamente.

5.2.1.4 Ensaio 05: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens de polímero aniônico como auxiliar de floculação

O objetivo do ensaio 05 foi o mesmo do ensaio 04, ou seja, testar a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO aplicando PAC como coagulante e um polímero auxiliar de floculação. As configurações do ensaio 05 e os resultados dos residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO são apresentados na tabela 5.10 por meio da qual foram elaboradas as figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29, respectivamente.

Tabela 5.10: Configurações do ensaio 05 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	50	0	89,7	1735	1075	NR
2	50	1	52,8	1230	1170	NR
3	50	2	36,7	1050	1040	305
4	50	3	77,6	1300	1050	NR
5	100	0	83,9	1535	1205	NR
6	100	1	55,4	1040	940	NR
7	100	2	36,8	795	790	293
8	100	3	29,8	785	780	268
9	125	0	83,0	1475	1225	NR
10	125	1	53,6	910	802	NR
11	125	2	61,6	770	676	NR
12	125	3	26,1	515	514	268
13	150	0	74,3	1315	945	NR
14	150	1	41,6	715	520	NR
15	150	2	15,1	515	462	197
16	150	3	14,6	305	300	188
17	175	0	70,5	1210	590	NR
18	175	1	20,0	330	320	201
19	175	2	4,7	311	310	163
20	175	3	3,7	310	308	158
21	200	0	82,5	1470	388	NR
22	200	1	11,0	330	304	170
23	200	2	9,9	355	284	167
24	200	3	12,8	371	266	170
25	250	0	79,8	1230	295	NR
26	250	1	6,2	280	276	164
27	250	2	3,2	297	203	160
28	250	3	4,1	301	214	168

*NR: não realizado

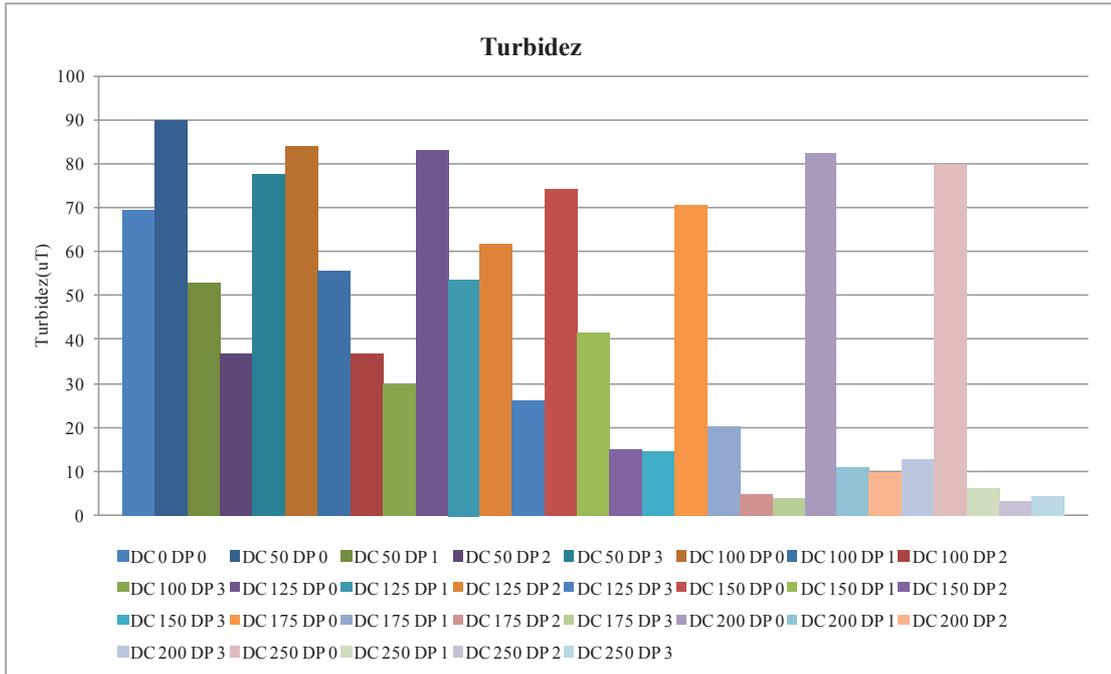


Figura 5.26: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 05

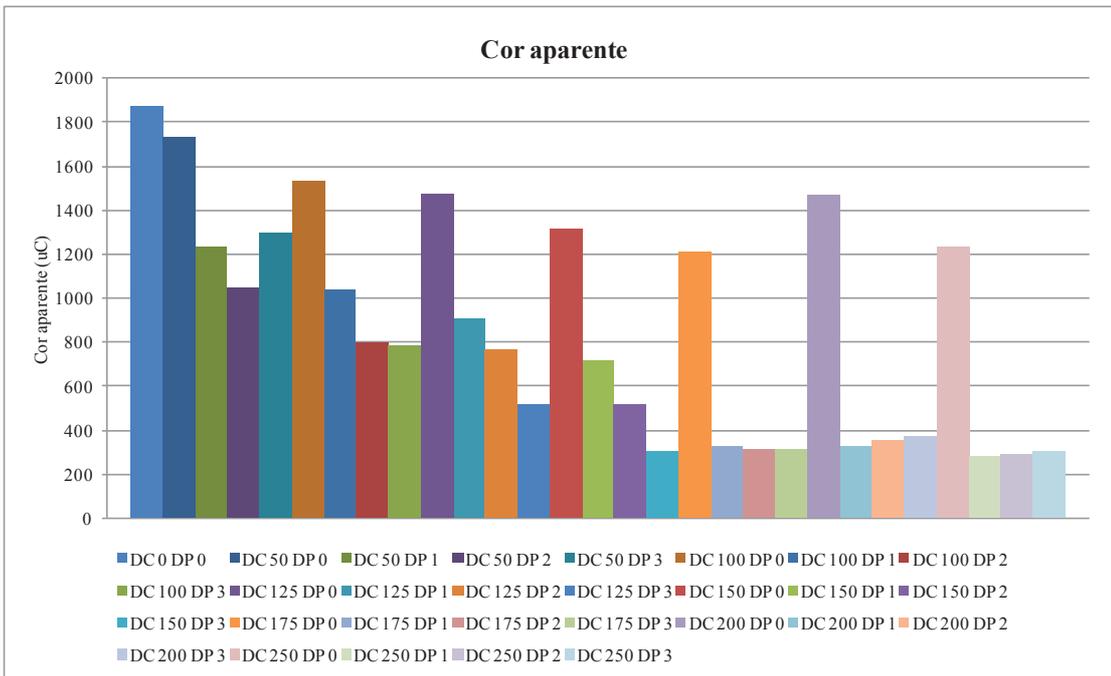


Figura 5.27: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 05

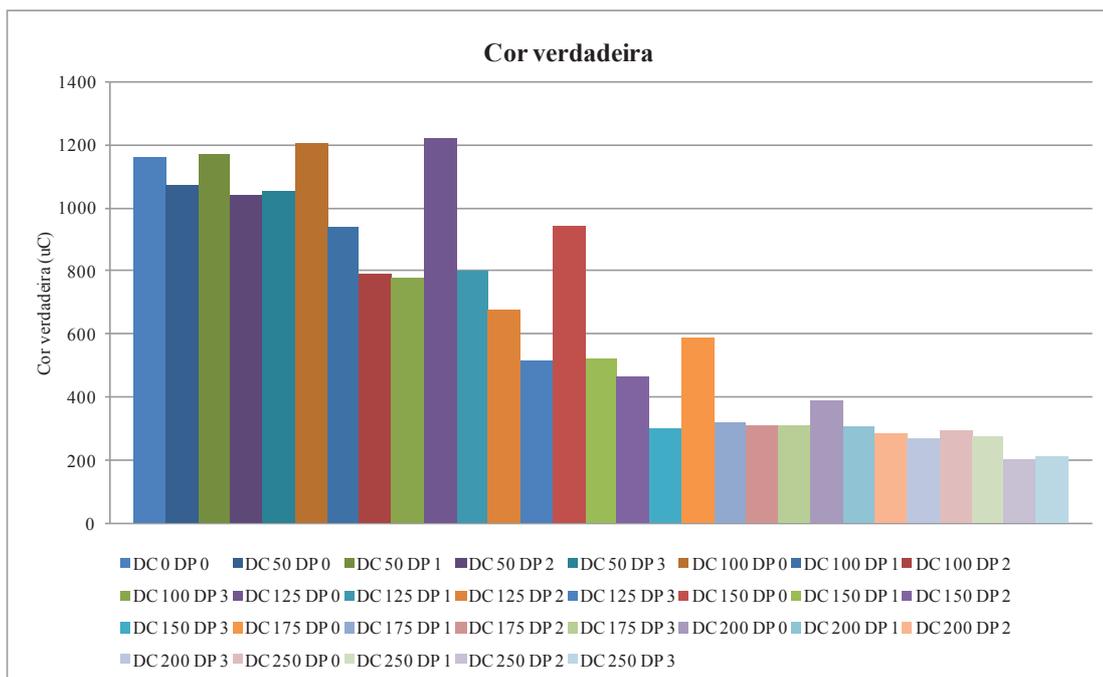


Figura 5.28: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 05

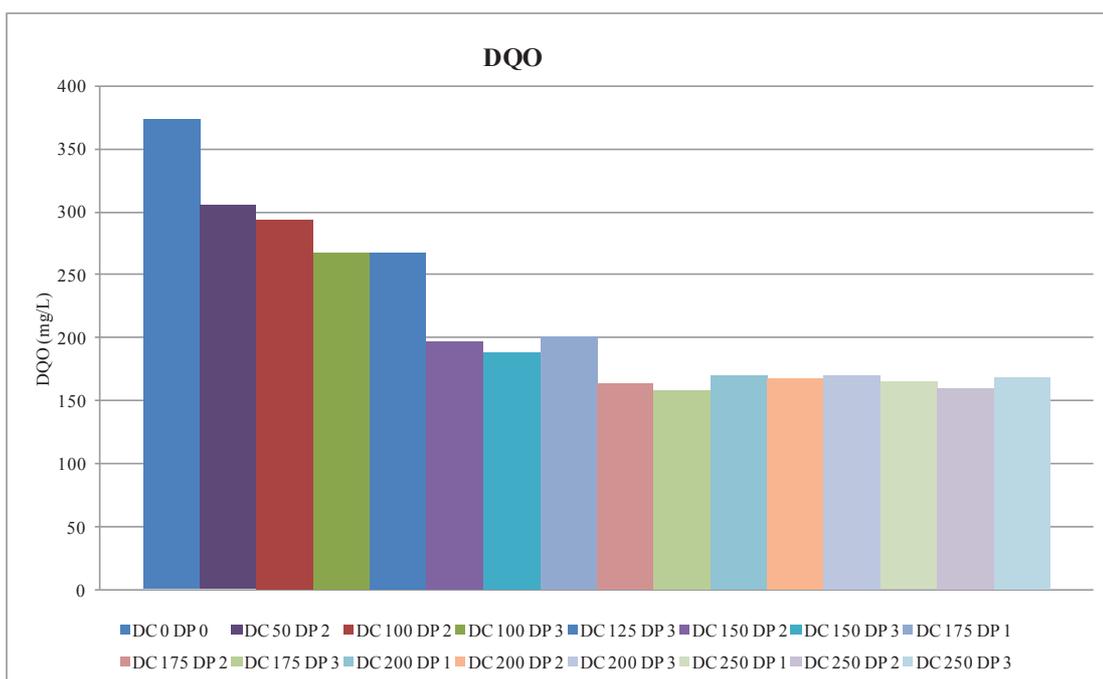


Figura 5.29: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 05

Além dos valores residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO, outra forma de analisar os dados é por meio do cálculo da eficiência de remoção desses parâmetros, em valores percentuais, em relação ao efluente bruto. Os resultados de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO, obtidos no ensaio 05, são apresentados nas figuras 5.30, 5.31,

5.32 e 5.33, respectivamente.

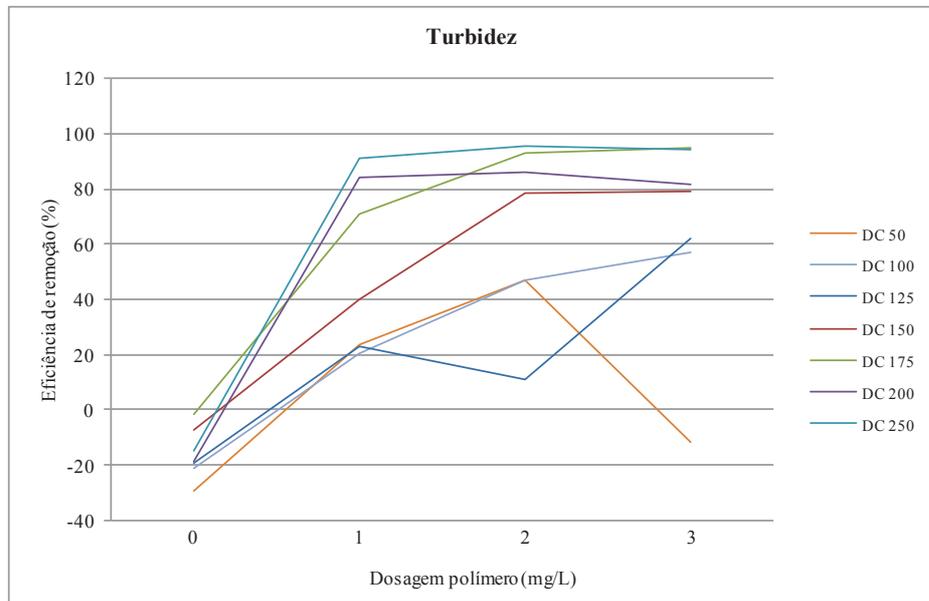


Figura 5.30: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 05

Os melhores resultados de remoção de turbidez foram encontrados para as dosagens de 175, 200 e 250mg/L de PAC com adição de polímero. O melhor resultado de remoção de turbidez foi 95,39%, obtido para o jarro em que foi dosado 250mg/L de PAC com 2mg/L de polímero. No entanto, as demais dosagens de polímero para combinadas com essa dosagem de PAC proporcionaram resultados similares, 91,07% para 1mg/L de polímero e 94,09% para 3mg/L de polímero. Foram encontrados 93,21% e 94,65% como resultado de remoção nos jarros em que foram dosados 175mg/L de PAC com 2 e 3 mg/L de polímero, respectivamente.

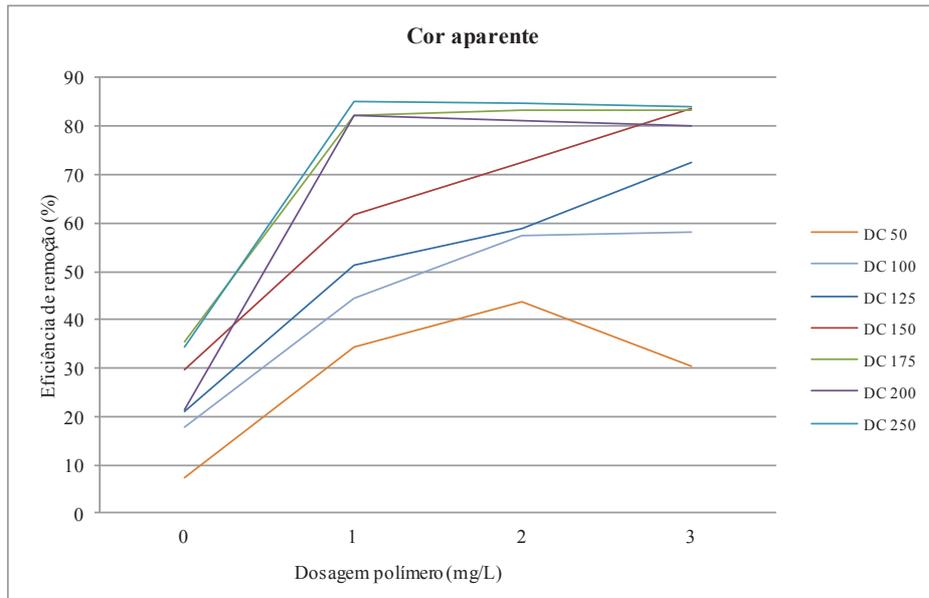


Figura 5.31: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 05

Similarmente à remoção de turbidez, a remoção de cor foi maior para as dosagens de 175, 200 e 250mg/L de PAC com adição de polímero. Houve remoções parecidas entre essas dosagens de PAC para as três dosagens de polímero empregadas. O melhor resultado foi 85,03% de remoção, obtida na amostra coletada do jarro em que foi dosado 250mg/L de PAC com 1mg/L de polímero.

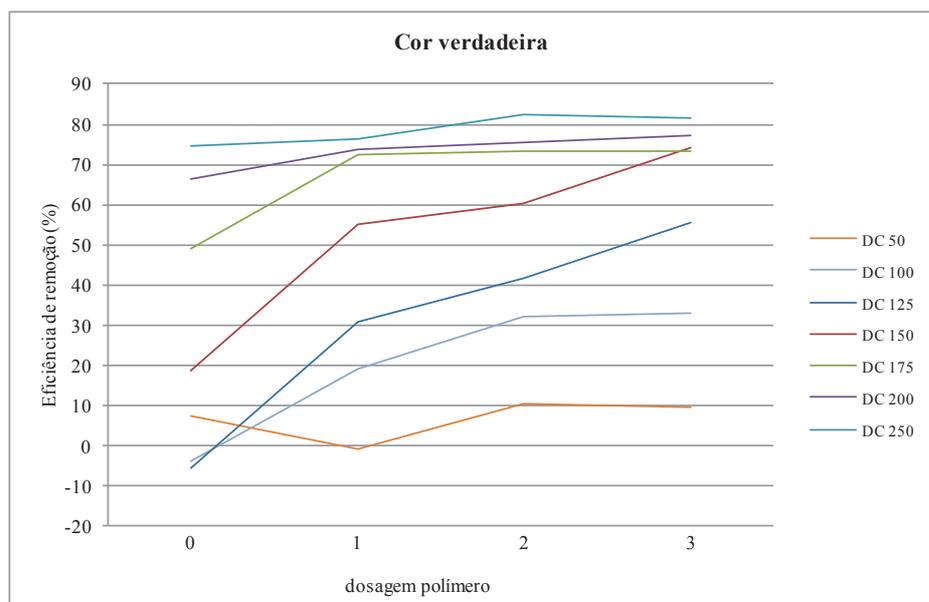


Figura 5.32: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 05

Seguindo o observado nos dois parâmetros anteriores, a remoção de cor verdadeira foi

mais eficiente para as dosagens de 175, 200 e 250mg/L de PAC. O melhor resultado foi 82,5% de remoção na amostra coletada do jarro em que foi dosado 250mg/L de PAC com 2mg/L de polímero. Comparando-se as remoções de cor aparente e verdadeira nas configurações sem adição de polímero notou-se significativa diferença entre os resultados. Por exemplo, para a dosagem de 250mg/L houve um acréscimo de 34,22% de remoção de cor aparente para 74,57% de remoção de cor verdadeira. O mesmo também foi observado no ensaio 04, e a explicação é a mesma para esse ensaio. Baseia-se no fato de que a cor aparente tem origem na presença de sólidos dissolvidos na amostra, mas sofre influência dos sólidos em suspensão, ou seja, da turbidez da amostra, que nas configurações sem adição de polímero segue elevada. Já a cor verdadeira é medida após a centrifugação da amostra, esse processo remove os sólidos em suspensão, diminuindo o valor da cor verdadeira em relação à cor aparente.

A análise das figuras 5.30, 5.31 e 5.32 confirmou a hipótese de que a adição de polímero como auxiliar de floculação melhora a qualidade do sobrenadante em todos os aspectos analisados. Observando-se a inclinação das linhas de cada série, que representam as dosagens de coagulante, notou-se que para as dosagens menores há efeito evidente do aumento da dosagem de polímero na remoção dos parâmetros analisados. Isso ocorre para 50, 100, 125 e 150mg/L de PAC. Nessas dosagens, há melhoria da qualidade do sobrenadante diretamente proporcional ao aumento nas dosagens de polímero. Já nas dosagens maiores de coagulante, o aumento na dosagem de polímero não causa influência significativa. Isso pode ser observado nos resultados de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira para 175, 200 e 250mg/L de PAC. Nessas três dosagens de coagulante as três dosagens de polímero acarretaram em remoções similares.

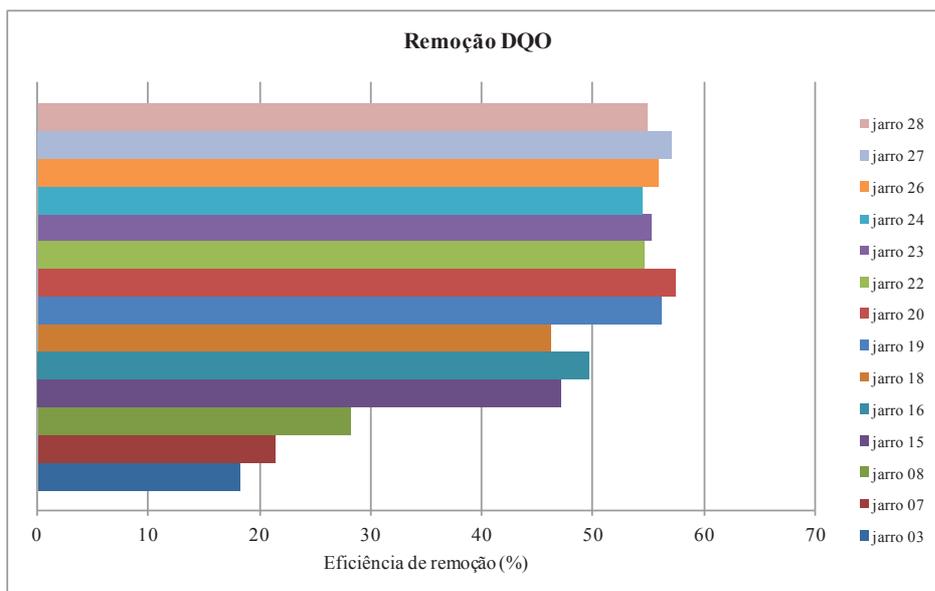


Figura 5.33: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 05

A remoção de DQO foi calculada somente nas amostras em que houve boa remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira. O melhor resultado foi obtido na amostra coletada do jarro 20, em que foi dosado 175mg/L de PAC com 3mg/L de polímero, 57,51% de remoção, seguido por 57,1% de remoção no jarro 27, em que foi dosado 250mg/L de PAC com 2mg/L de polímero.

5.2.1.5 Produção e características de sedimentabilidade do lodo

A produção de lodo e sua sedimentabilidade foram avaliadas por meio do IVL. O valor de IVL de cada jarro é apresentado na figura 5.34.

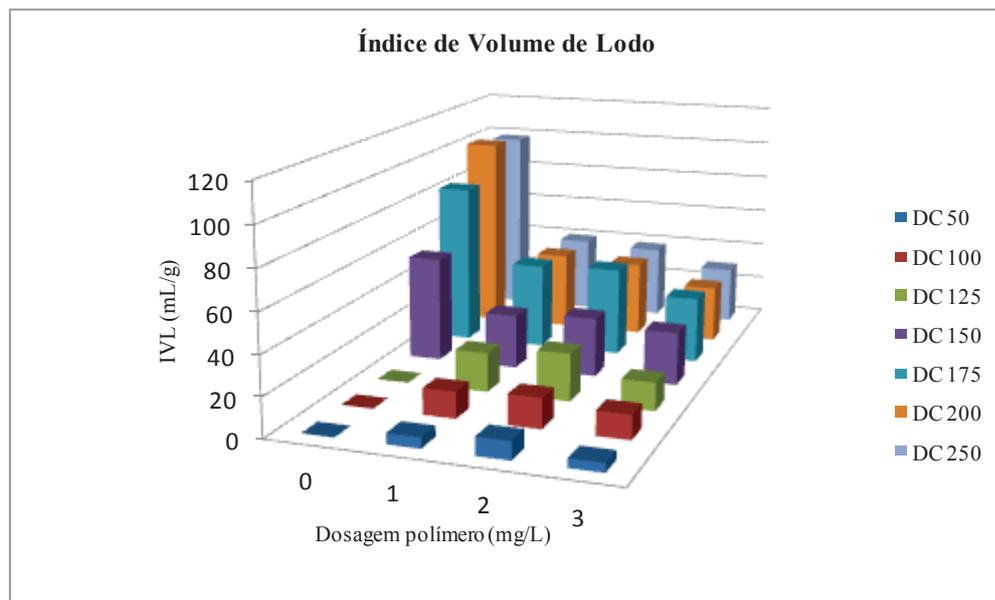


Figura 5.34: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 05

Observou-se que a adição de polímero melhorou a sedimentabilidade do lodo a partir da dosagem de 150mg/L de PAC. Nas dosagens inferiores, somente com o uso de PAC, o valor do IVL é praticamente nulo, mostrando que não houve formação de lodo, pois não houve remoção de turbidez e cor. O menor valor de IVL obtido, que representa o melhor lodo em termos de sedimentabilidade, foi 27,2mL/g para o jarro em que foi dosado 175mg/L de PAC com 3mg/L de polímero, no entanto, nas dosagens de 175, 200 e 250mg/L de PAC todos os jarros com adição de polímero tiveram IVL similares, indicando boa sedimentabilidade do lodo produzido nessas configurações.

Ribeiro (2007) aponta que, dependendo do tipo e disposição do lodo, os custos com transporte e disposição final podem compor parcela significativa nos custos totais da ETE. Januário e Ferreira Filho (2007) trazem ainda que os custos com transporte e disposição final do lodo em regiões metropolitanas estavam à época entre R\$100 a R\$150 por tonelada, o que tem justificado pesquisas que permitam a menor geração de lodo, acarretando na diminuição desses custos.

5.2.1.6 Ensaio 06: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando ampla faixa de dosagens de PAC como coagulante, utilizado individualmente e combinado com diferentes dosagens de polímero aniônico como auxiliar de floculação

O objetivo do ensaio 06 foi o mesmo do ensaio 04 e 05, ou seja, testar a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO, aplicando PAC como coagulante e um polímero auxiliar de floculação. As configurações do ensaio 06 e os resultados dos residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO são apresentados na tabela 5.11 por meio da qual foram elaboradas as figuras 5.35, 5.36, 5.37 e 5.38, respectivamente.

Tabela 5.11: Configurações do ensaio 06 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	50	0	285,0	2180	1810	NR
2	50	1	61,5	2716	1545	NR
3	50	2	42,0	1716	1450	NR
4	50	3	54,8	1450	1515	NR
5	100	0	308,0	2360	1995	NR
6	100	1	55,5	1412	1410	NR
7	100	2	42,7	1108	1100	NR
8	100	3	42,8	1136	1125	NR
9	125	0	252,0	2295	1810	NR
10	125	1	82,6	1632	1560	NR
11	125	2	52,3	1184	1276	NR
12	125	3	70,1	1424	1370	NR
13	150	0	312,0	2295	2055	NR
14	150	1	78,3	1424	1320	NR
15	150	2	48,9	976	965	NR
16	150	3	50,9	988	900	NR
17	175	0	374,0	2430	2030	NR
18	175	1	50,4	976	965	337
19	175	2	40,7	814	730	276
20	175	3	28,0	638	620	282
21	200	0	328,0	2345	1825	NR
22	200	1	49,1	880	780	210
23	200	2	18,6	468	435	216
24	200	3	19,6	493	392	221
25	250	0	329,0	2410	508	NR
26	250	1	13,4	347	291	196
27	250	2	4,6	241	258	183
28	250	3	8,7	267	247	179

*NR: Não realizado

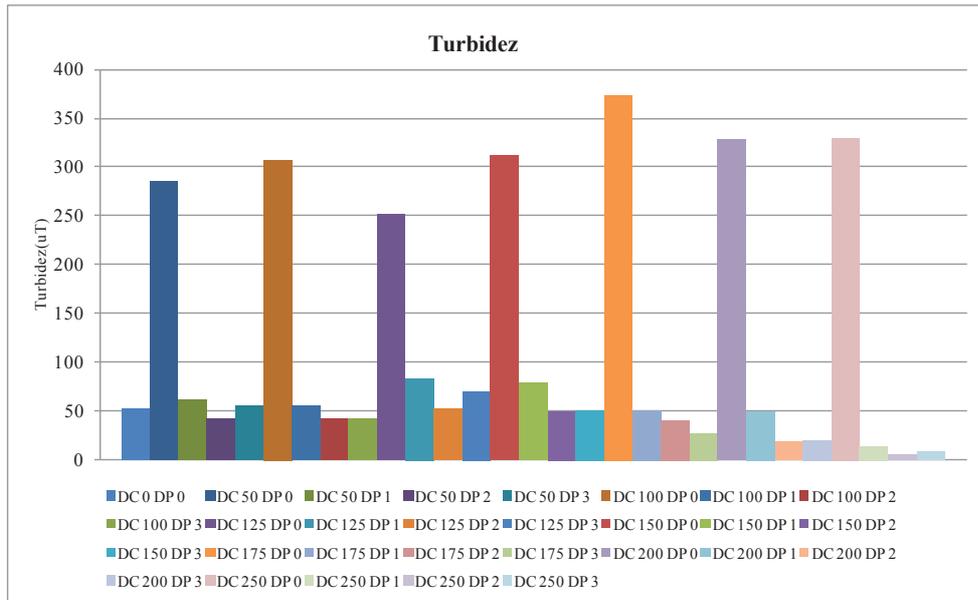


Figura 5.35: Resultado do residual de turbidez obtido no ensaio 06

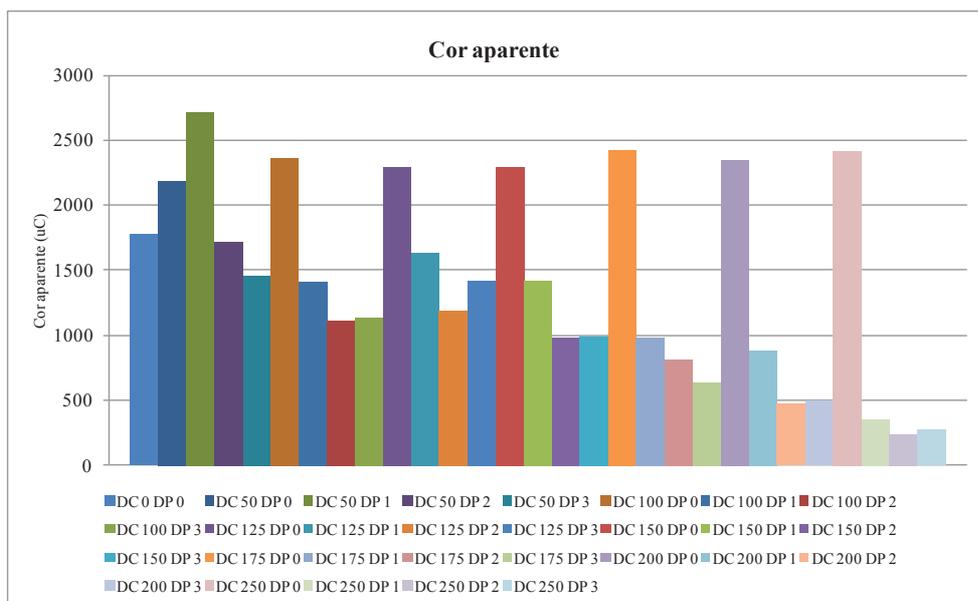


Figura 5.36: Resultado do residual de cor aparente obtido no ensaio 06

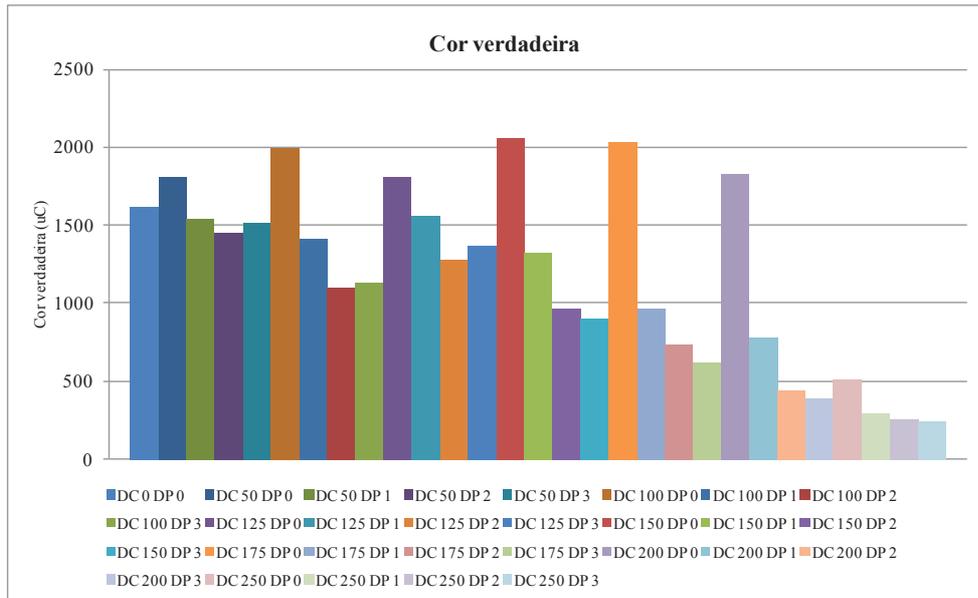


Figura 5.37: Resultado do residual de cor verdadeira obtido no ensaio 06

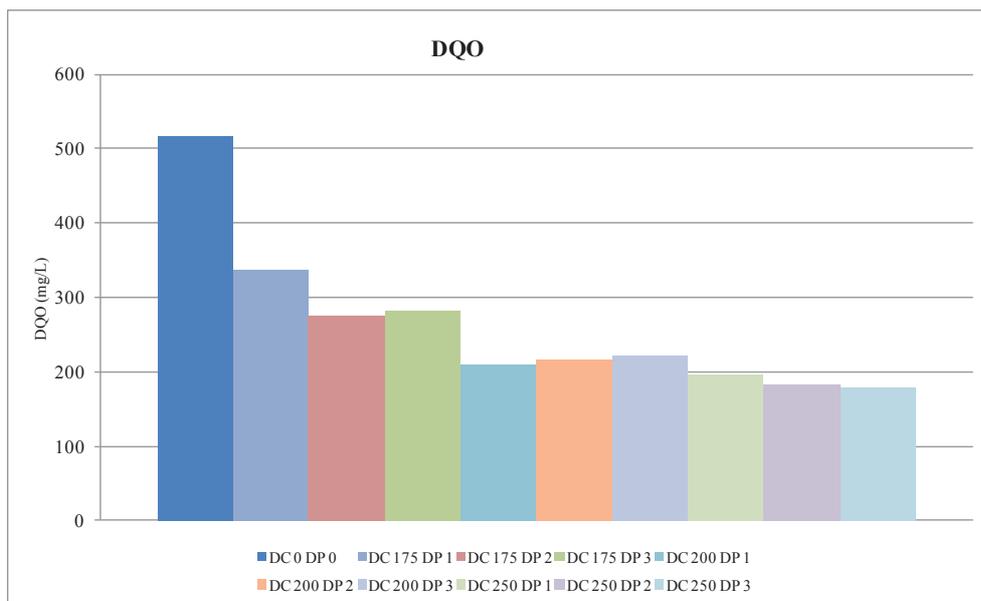


Figura 5.38: Resultado do residual de DQO obtido no ensaio 06

Os resultados de eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO são apresentados nas figuras 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 respectivamente.

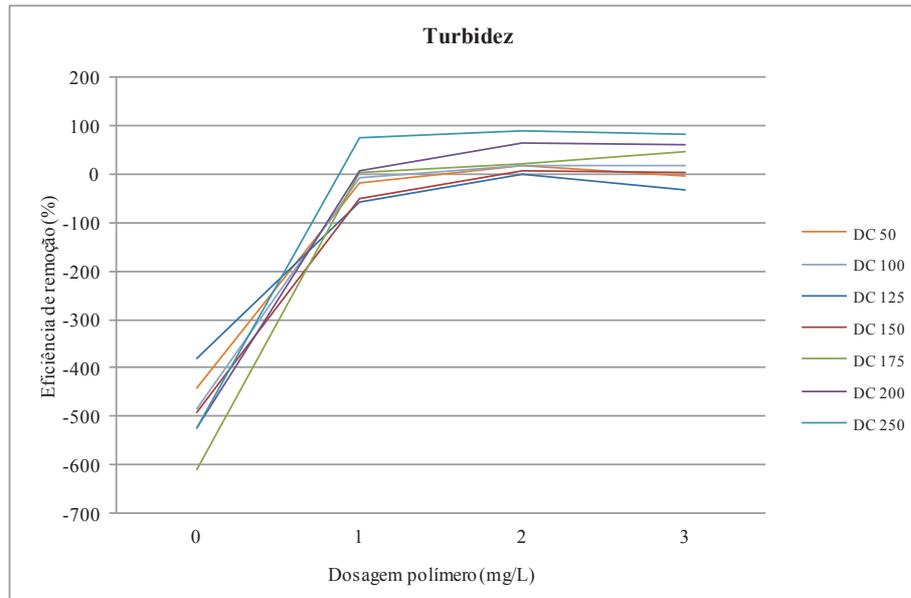


Figura 5.39: Resultados das remoções de turbidez obtidas no ensaio 06

O ensaio 06 tornou ainda mais evidente o efeito da adição do polímero para o êxito do tratamento empregado. Todas as configurações sem polímero apresentaram “eficiência negativa” de remoção o que significa que a turbidez do sobrenadante foi maior que a turbidez da amostra bruta, ou seja, o tratamento não foi capaz de remover os sólidos e ainda fez com que a quantidade desses sólidos aumentasse, conferindo turbidez à amostra. Observando-se, por exemplo, a série que representa a dosagem de 250mg/L de PAC houve aumento de turbidez de 525,48% no jarro sem polímero e remoção de 74,52% no jarro com 1mg/L de polímero. A eficiência aumenta ainda mais no jarro em que foi dosado 250mg/L de PAC e 2mg/L de polímero sendo 91,29% a eficiência de remoção, sendo que esse resultado foi o melhor do ensaio 06.

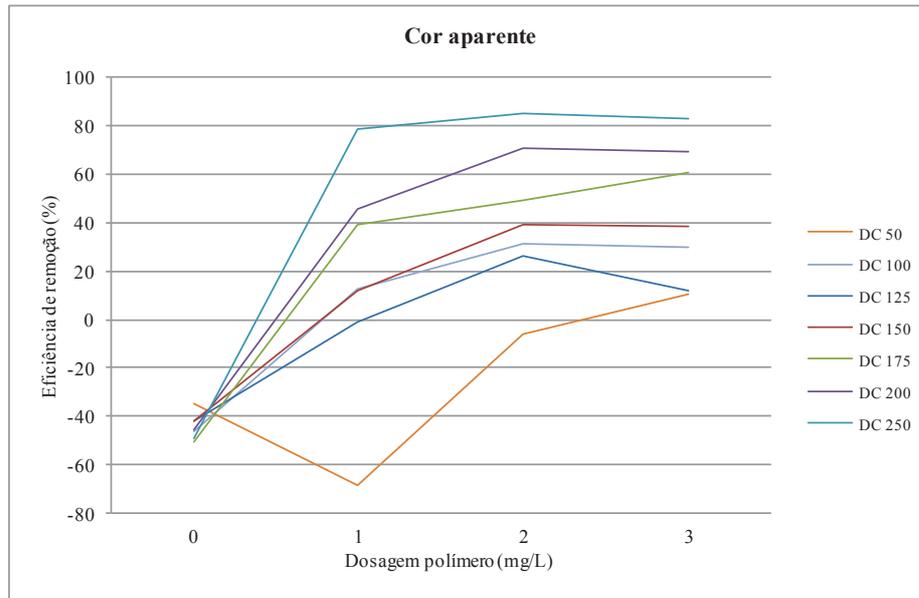


Figura 5.40: Resultados das remoções de cor aparente obtidas no ensaio 06

Os melhores resultados de remoção de cor aparente foram obtidos nos jarros em que foi dosado 250mg/L de PAC com adição de polímero sendo que o melhor resultado de remoção foi 85,08% para o jarro em que foi dosado 2mg/L de polímero, no entanto, as demais dosagens de polímero testadas para essa dosagem de PAC proporcionaram remoções próximas, 78,51% e 83,47% para 1 e 3mg/L de polímero, respectivamente. Conforme já havia sido observado na remoção de turbidez, a remoção de cor melhorou com adição de polímero.

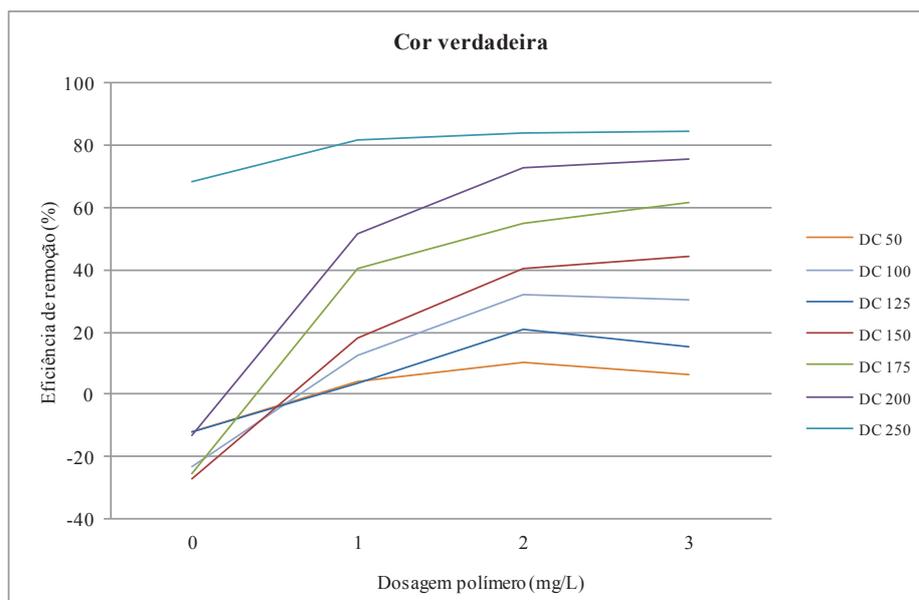


Figura 5.41: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas no ensaio 06

A remoção de cor verdadeira seguiu a tendência da remoção de cor aparente com exceção da amostra retirada do jarro em que foi dosado somente 250mg/L de PAC, sem adição de polímero. Nesse caso não foi verificada remoção de cor aparente, devido à turbidez da amostra ser alta. Como previamente à análise de cor verdadeira a amostra passa por centrifugação, houve remoção de cor verdadeira, proporcionada por esse processo. O melhor resultado obtido foi de 84,71% de remoção para 250mg/L de PAC com 3mg/L de polímero.

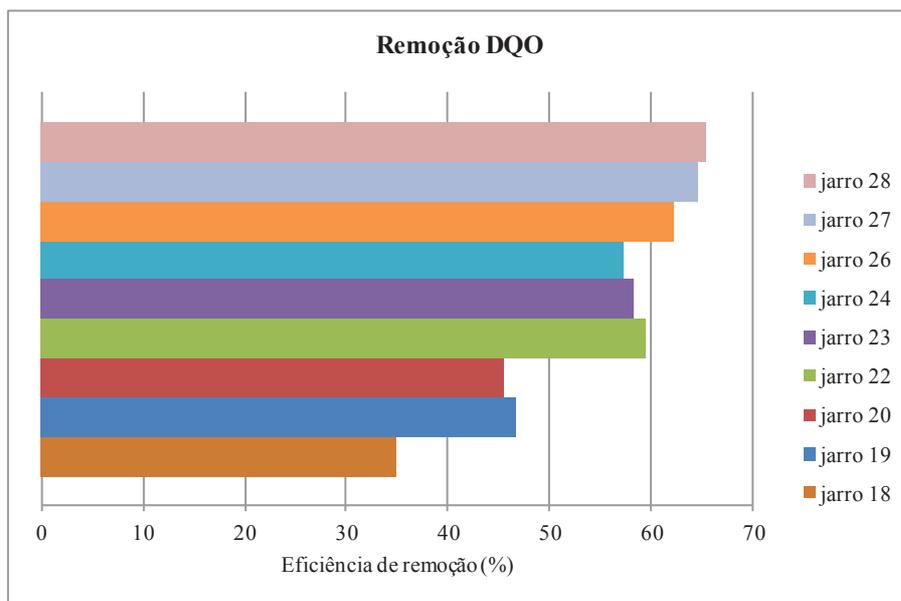


Figura 5.42: Resultados das remoções de DQO obtidas no ensaio 06

O melhor resultado de remoção de DQO foi de 65,44%, obtido no jarro 28, seguido por 64,67% no jarro 27. Ambos referem-se à dosagem de 250mg/L de PAC com adição de 3 e 2mg/L de polímero, respectivamente.

5.2.1.7 Produção e características de sedimentabilidade do lodo

O índice volumétrico de lodo foi estimado para todas as configurações empregadas nesse ensaio. Os resultados do IVL do ensaio 06 são apresentados na figura 5.43.

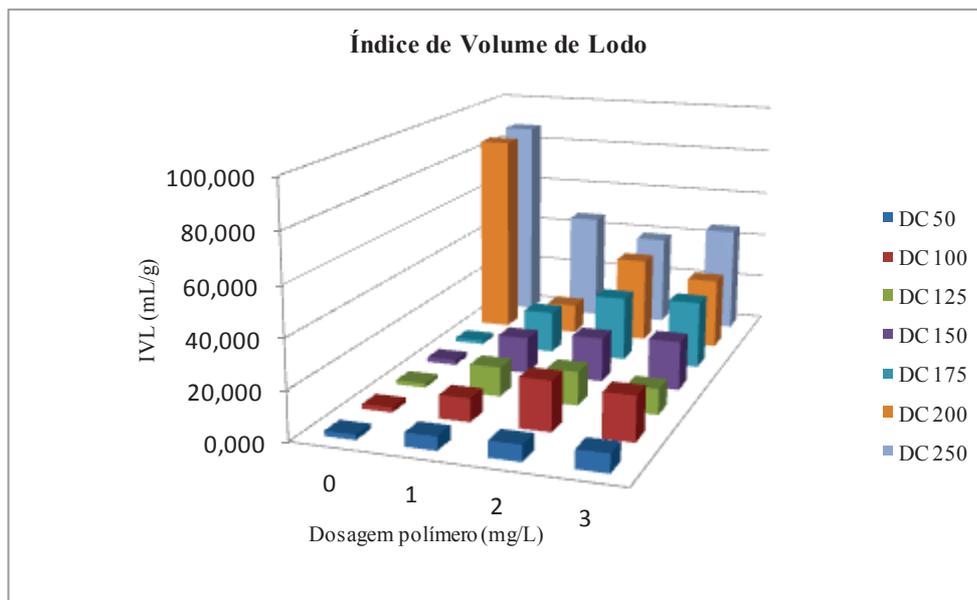


Figura 5.43: Resultados do índice volumétrico de lodo, obtidos a partir das configurações testadas no ensaio 06

Conforme já havia sido observado nos ensaios 04 e 05, no ensaio 06 o IVL melhorou com adição de polímero. O melhor resultado de IVL foi de 12,51mL/g, encontrado no jarro em que foi dosado 250mg/L de PAC com 1mg/L de polímero.

Vieira (2009) também avaliou o IVL a partir de ensaios de coagulação/floculação/sedimentação em *jar-test*. O autor testou dois coagulantes, sulfato de alumínio e cloreto férrico, combinados com um auxiliar de floculação aniônico. Obteve 100mL/g como melhor resultado de IVL para 200mg/L de coagulante com 1,3mg/L de polímero.

A partir da análise dos três ensaios que compõe a primeira fase da segunda etapa observou-se dificuldade em se obter uma única dosagem ótima de coagulante e auxiliar de floculação já que as características do efluente bruto, coletado na ETE da indústria, variam a cada coleta. Todavia, o tratamento empregado com PAC como coagulante e polímero aniônico como auxiliar de floculação mostrou-se eficiente em todos os ensaios realizados, mesmo com essas variações. O mesmo foi observado por Santos (2001), que também encontrou essa

dificuldade, mas concluiu que o cloreto férrico como coagulante foi capaz de remover os parâmetros observados em todos os ensaios, mesmo com as variações de pH e de contaminantes nas amostras brutas.

5.2.2 Resultados da segunda fase: ensaios principais de coagulação/floculação/sedimentação, utilizando as melhores dosagens de PAC e polímero aniônico e variando os tempos de mistura lenta.

O objetivo da segunda fase foi diminuir o tempo de mistura lenta de 10 minutos, que estava sendo utilizado nos ensaios anteriores, para 07 e 05 minutos e avaliar as respostas do tratamento empregado a partir dessas novas condições operacionais.

5.2.2.1 Caracterização do efluente utilizado na segunda fase da segunda etapa

O efluente foi caracterizado antes de passar pelo tratamento. Na tabela 5.12 são apresentados os parâmetros monitorados nas coletas (numeradas em ensaio 07 e 08) realizadas durante a segunda fase da segunda etapa. Observaram-se variações nas características do efluente entre um ensaio e outro, justificando a importância da caracterização prévia do efluente.

Tabela 5.12: Caracterização do efluente nos ensaios da segunda fase da segunda etapa

Parâmetro	Ensaio 07	Ensaio 08
Turbidez (uT)	61,5	24,1
Cor aparente (uC)	1884	842
Cor verdadeira (uC)	1784	558
DQO (mg/L)	583	261
DBO (mg/L)	23	8
ST (mg/L)	1678	1399
SST (mg/L)	86	38
pH	7,6	7,4
Temperatura (°C)	21,2	23,4
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	<0,1	<0,1
Fósforo (mg/L)	0,2	<0,1
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	4,25	3,98
Alcalinidade (mg/L)	88	80

5.2.2.2 Ensaio 07: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando PAC como coagulante, polímero aniônico como auxiliar de floculação e menores tempos de floculação

O ensaio 07 foi dividido em duas séries, a e b, sendo que na primeira (07a) o tempo de floculação empregado foi de 07 minutos e na segunda (07b) de 05 minutos.

As configurações do ensaio 07a e os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO encontram-se na tabela 5.13, por meio da qual foi elaborada a figura 5.44.

Tabela 5.13: Configurações do ensaio 07a e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	175	0	302,0	2567	1767	507
2	175	1	50,6	790	602	288
3	175	2	49,8	791	598	276
4	175	3	47,1	785	591	274
5	200	0	277,0	2340	1755	476
6	200	1	26,2	556	544	263
7	200	2	27,4	596	586	271
8	200	3	14,4	453	436	240
9	250	0	337	2730	810	509
10	250	1	9,12	339	303	235
11	250	2	7,1	293	258	239
12	250	3	9,5	309	232	205

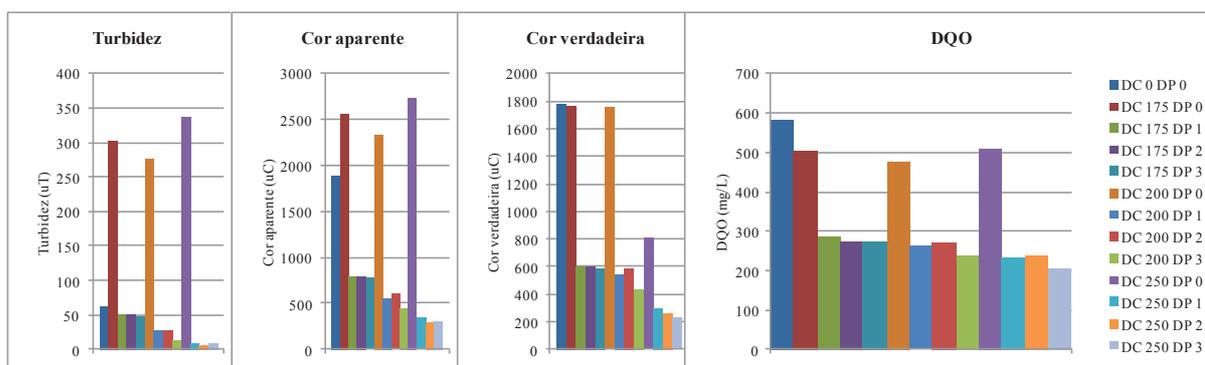


Figura 5.44: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 07a

As configurações do ensaio 07b e os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO encontram-se na tabela 5.14, por meio da qual foi elaborada a figura 5.45.

Tabela 5.14: Configurações do ensaio 07b e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	175	0	492,0	3851	2474	710
2	175	1	102,7	1106	883	403
3	175	2	99,9	1028	818	386
4	175	3	98,6	1021	809	384
5	200	0	591,0	2905	2190	565
6	200	1	84,0	900	780	378
7	200	2	80,2	894	844	387
8	200	3	85,6	845	772	351
9	250	0	432,0	2901	950	546
10	250	1	44,6	747	454	359
11	250	2	42,9	778	474	346
12	250	3	45,3	767	445	311

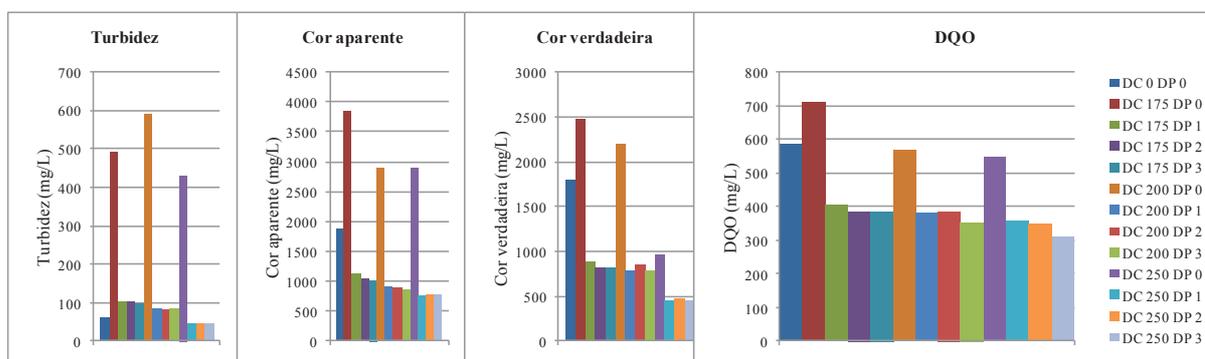


Figura 5.45: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 07b

Observando-se os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO apresentados nas tabelas 5.13 e 5.14 e nas figuras 5.44 e 5.45, nota-se que a configuração sem adição polímero aumentou esses residuais no sobrenadante em relação ao efluente bruto. Para facilitar a análise e compreensão dos ensaios 07a e 07b foram analisadas somente as eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO dos jarros com adição de polímero. Essas eficiências são apresentadas nas figuras 5.46, 5.47, 5.48 e 5.49, respectivamente.

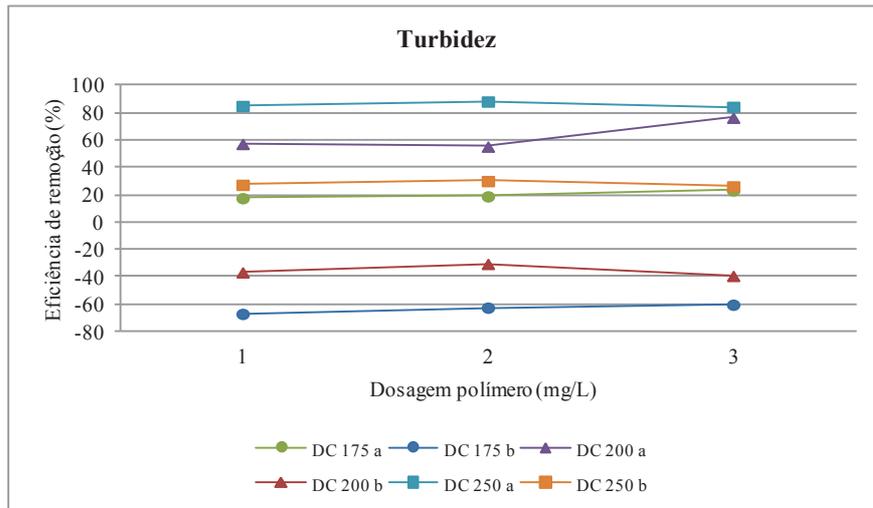


Figura 5.46: Resultados das remoções de turbidez obtidas nos ensaios 07a e 07b para os ensaios com adição de polímero

Foi possível observar que, comparando as séries de dosagens estudadas em cada ensaio, no ensaio 07a foram obtidos os valores mais elevados de remoção de turbidez em relação ao ensaio 07b. A série com dosagem de PAC igual a 250mg/L do ensaio 07b foi mais eficiente que a série com dosagem de PAC 175mg/L do ensaio 07a, sendo esse o único caso em que o ensaio 07b superou o ensaio 07a, mostrando que para tempos de floculação menores devem ser aumentadas as dosagens de coagulante. Os melhores resultados foram obtidos no ensaio 07a, para dosagem de PAC igual a 250mg/L, sendo maior que 80% de remoção para todas as dosagens de polímero.

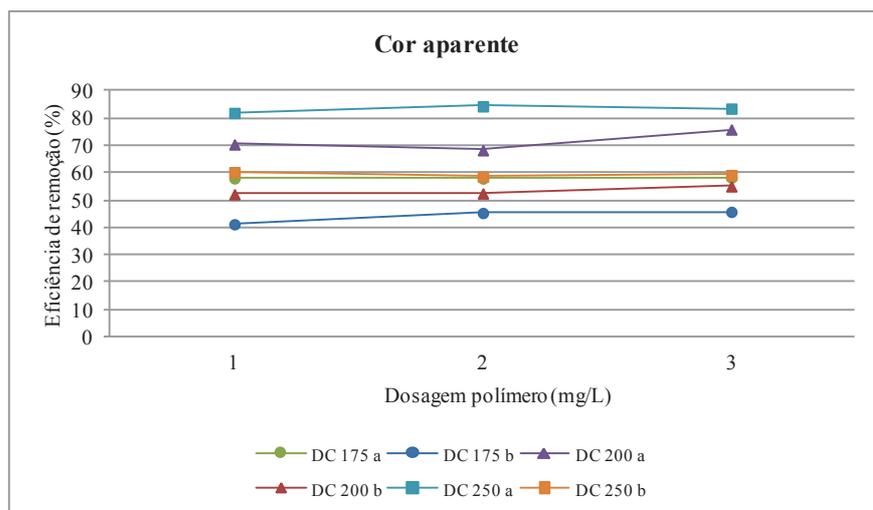


Figura 5.47: Resultados das remoções de cor aparente obtidas nos ensaios 07a e 07b para os ensaios com adição de polímero

Em relação à remoção de cor aparente, há menor influência do tempo de floculação já que as eficiências dos ensaios a e b, apesar de não serem tão próximas entre si, são menos distantes que aquelas observadas na remoção de turbidez já quase todas as configurações de dosagem resultaram em remoções entre 40% e 80%. Os únicos casos com remoção maior que 80% foram no ensaio 07a, para dosagem de PAC de 250mg/L, em todas as dosagens de polímero.

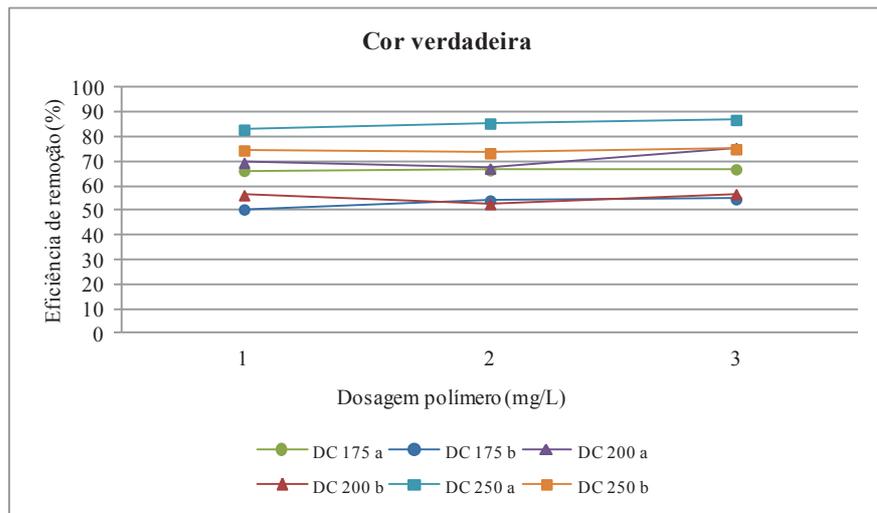


Figura 5.48: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas nos ensaios 07a e 07b para os ensaios com adição de polímero

A remoção de cor verdadeira seguiu a tendência da remoção de cor aparente e nesse caso o tempo de floculação teve influência ainda menor no resultado do que aquela observada no caso da cor aparente. Observou-se que a maior dosagem de coagulante, 250mg/L de PAC, foi a mais eficiente nos dois ensaios, a e b, mostrando que a dosagem, mais que o tempo de floculação, influenciou o tratamento. Os melhores resultados foram encontrados no ensaio 07a para dosagem de 250mg/L de PAC, em todas as dosagens de polímero, obtendo-se valores superiores a 80% de remoção.

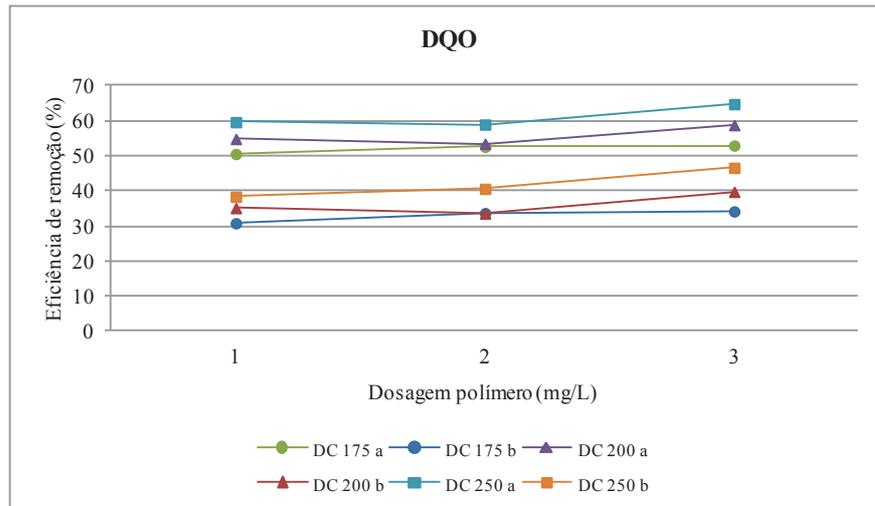


Figura 5.49: Resultados das remoções de DQO obtidas nos ensaios 07a e 07b para os ensaios com adição de polímero

A remoção de DQO, mostrada na figura 5.48, deixou clara a superioridade do ensaio 07a em relação ao 07b já que no primeiro obteve-se mais que 50% de remoção de DQO em todas as dosagens testadas e no segundo não se obteve 50% de remoção em nenhuma dosagem. Similarmente aos demais parâmetros, a configuração que teve melhor eficiência foi no ensaio 07a, com 250mg/L de PAC, em todas as dosagens de polímero.

5.2.2.3 Ensaio 08: ensaios de coagulação/floculação/sedimentação utilizando PAC como coagulante, polímero aniônico como auxiliar de floculação e menores tempos de floculação

O ensaio 08 foi dividido em duas séries, a e b, sendo que na primeira (08a) o tempo de floculação empregado foi de 07 minutos e na segunda (08b) 05 minutos.

As configurações do ensaio 08a e os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO encontram-se na tabela 5.15, por meio da qual foi elaborada a figura 5.50.

Tabela 5.15: Configurações do ensaio 08a e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	175	0	57,6	1113	181	250
2	175	1	17,3	237	239	122
3	175	2	6,5	202	121	120
4	175	3	6,3	198	106	110
5	200	0	58,1	1170	170	247
6	200	1	4,7	212	116	103
7	200	2	5,2	211	111	118
8	200	3	9,4	271	107	116
9	250	0	62,4	960	123	249
10	250	1	4,2	140	121	100
11	250	2	4,2	127	111	124
12	250	3	6,2	120	92	105

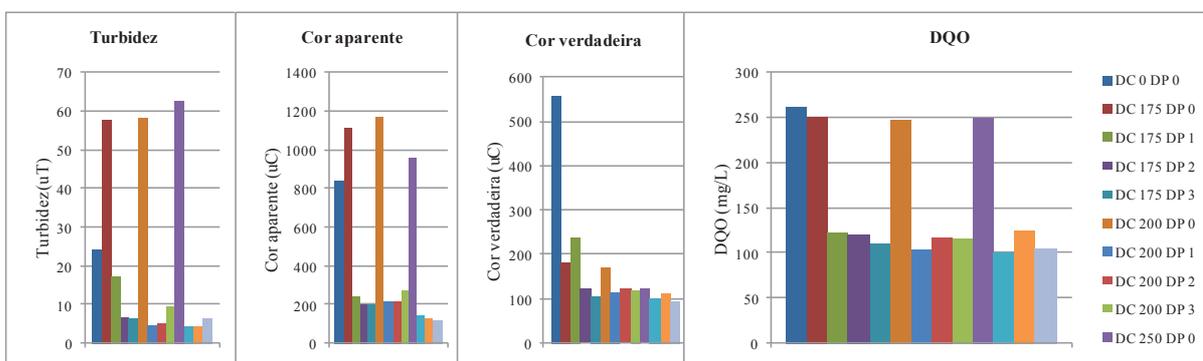


Figura 5.50: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 08a

As configurações do ensaio 08b e os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO encontram-se na tabela 5.16, por meio da qual foi elaborada a figura 5.51.

Tabela 5.16: Configurações do ensaio 08b e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)
1	175	0	97,9	1876	709	375
2	175	1	28,5	567	382	185
3	175	2	12,7	356	191	183
4	175	3	11,3	387	171	175
5	200	0	99,5	1732	467	391
6	200	1	13,8	314	190	165
7	200	2	14,1	314	189	177
8	200	3	9,8	392	215	176
9	250	0	108,7	1315	388	384
10	250	1	10,2	172	147	144
11	250	2	10,8	176	155	167
12	250	3	10,7	181	139	147

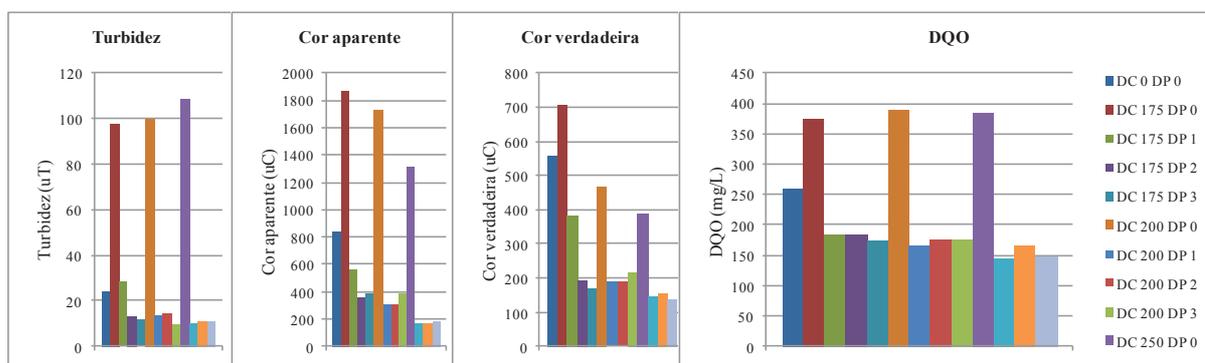


Figura 5.51: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO obtido no ensaio 08b

Similarmente ao que foi feito na análise do ensaio 07, no ensaio 08 foram analisadas somente as eficiências de remoção dos parâmetros para os jarros com adição de polímero, já que quando não há adição de polímero o tratamento não apresenta eficiência de remoção de nenhum parâmetro, em nenhuma dosagem estudada.

Ahmad et al (2008) também concluíram que a adição de polímeros teve um efeito significativo sobre o tempo de sedimentação dos flocos em comparação com o tratamento somente com coagulante. Os autores indicam que o uso de polímeros na floculação faz com que os flocos formados sejam maiores e mais fortes, e com isso tenham maior facilidade em

sedimentar.

As eficiências de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO proporcionadas pelo tratamento empregado estão apresentadas nas figuras 5.52, 5.53, 5.54 e 5.55, respectivamente.

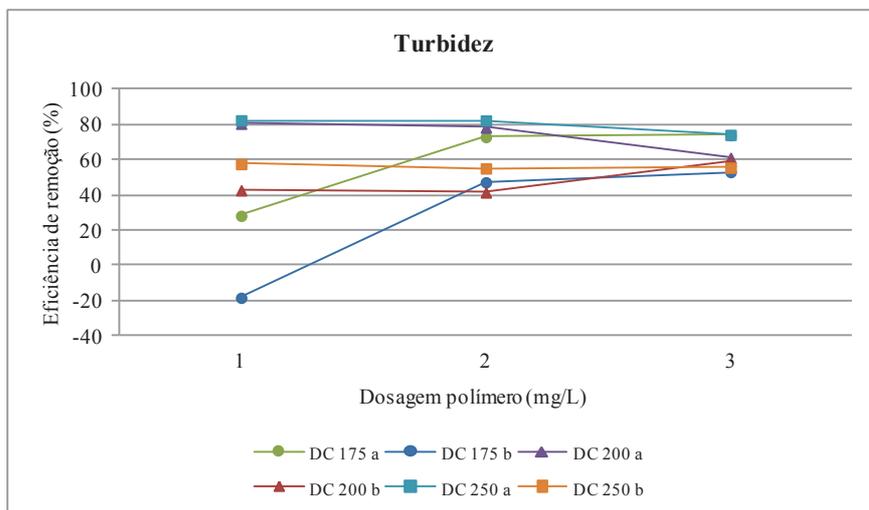


Figura 5.52: Resultados das remoções de turbidez obtidas nos ensaio 08a e 08b para os ensaios com adição de polímero

Observando-se os resultados apresentados na figura 5.52 percebeu-se que para a menor dosagem de polímero empregada (1mg/L) o aumento na dosagem de coagulante proporcionou maior remoção de turbidez, representada na figura 5.52 pelos pontos mais afastados entre si. Já para maior dosagem de polímero (3mg/L), a dosagem de coagulante teve menor efeito sobre o tratamento, sendo assim os pontos ficaram mais próximos.

Os melhores resultados de remoção de turbidez encontraram-se no ensaio 08a, nas dosagens de PAC igual a 200 e 250mg/L para todas as dosagens de polímero testadas.

No ensaio 08b não se obteve remoção maior que 60% em nenhuma combinação de dosagem. Concluiu-se então que o tempo de floculação, além da dosagem de coagulante, teve influência sobre a remoção de turbidez.

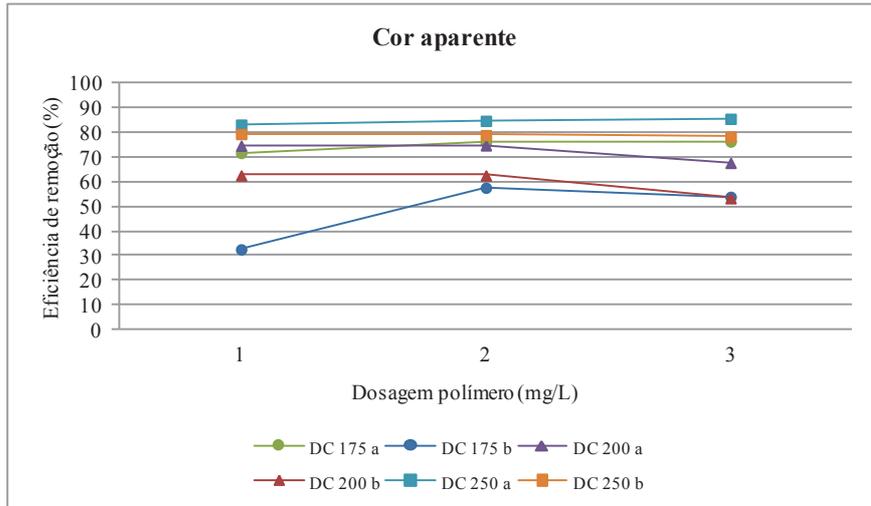


Figura 5.53: Resultados das remoções de cor aparente obtidas nos ensaio 08a e 08b para os ensaios com adição de polímero

Com exceção da menor dosagem de PAC e polímero no ensaio b, em que se obteve remoção inferior a 40%, em todas as demais combinações de dosagem foram obtidos mais de 40% de remoção de cor aparente, com destaque para a dosagem de 250mg/L de PAC no ensaio 08a, em que se obteve mais de 80% de remoção para todas as dosagens de polímero testadas. No ensaio 08b, para a maior dosagem de PAC empregada também foi obtida boa resposta, com remoções próximas a 80% para todas as dosagens de polímero. Isso mostra que o tempo de floculação não teve tanta influência na remoção de cor aparente como teve na remoção de turbidez.

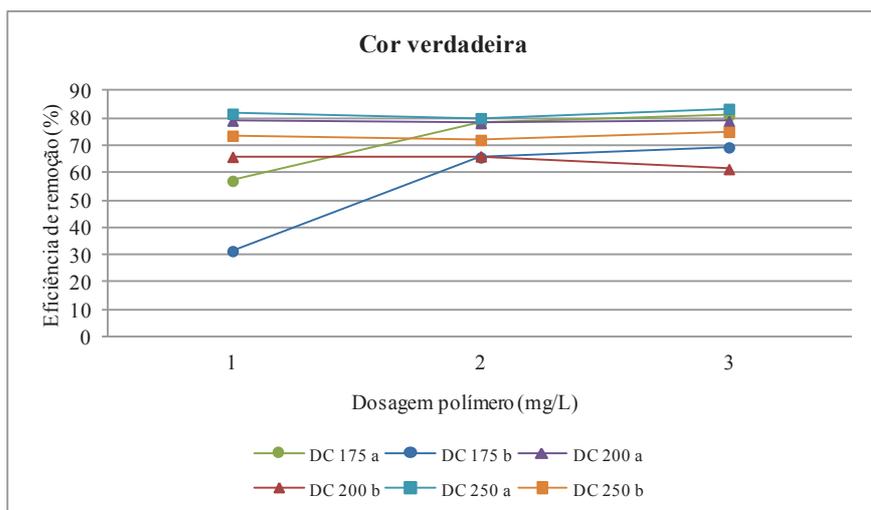


Figura 5.54: Resultados das remoções de cor verdadeira obtidas nos ensaio 08a e 08b para os ensaios com adição de polímero

A remoção de cor verdadeira foi similar a de cor aparente. Houve remoção maior que 50% para quase todos os casos, ficando abaixo disso somente a configuração com menor dosagem de coagulante combinada com a menor dosagem de polímeros nos ensaios 08a e 08b.

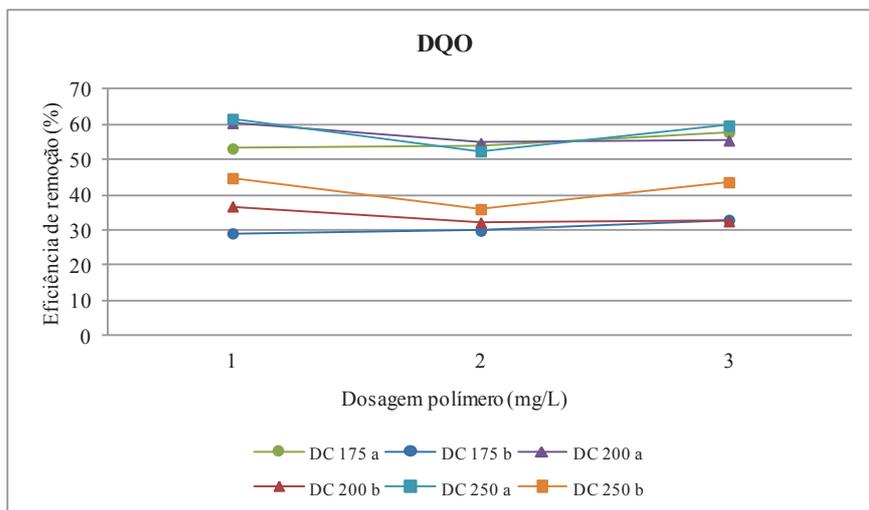


Figura 5.55: Resultados das remoções de DQO obtidas nos ensaio 08a e 08b para os ensaios com adição de polímero

Conforme o que havia sido observado na análise dos resultados de remoção de DQO no ensaio 07, no ensaio 08 há evidente superioridade do ensaio que contou com maior tempo de floculação (08a) em relação ao outro, com menor tempo. Para todas as combinações de dosagem do ensaio 08a foram obtidos mais de 50% de remoção de DQO, enquanto que no ensaio 08b, nenhuma combinação proporcionou mais de 50% de remoção.

Para todos os parâmetros analisados observou-se que o ensaio 08a proporcionou maiores eficiências de remoção que o ensaio 08b, similarmente ao que já havia sido observado na análise dos ensaios 07a e 07b. Sendo assim, conclui-se que o tempo de mistura lenta menor, 05 minutos, não foi viável ao tratamento empregado. Já o tempo de 07 minutos proporcionou boa resposta de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO nos dois ensaios, 07 e 08, semelhante ao que estava sendo obtido com 10 minutos de floculação. Desse modo, o tratamento é otimizado sem que haja prejuízos em termos de remoção dos contaminantes. A partir disso, para os próximos ensaios foi adotado 07 minutos como tempo de floculação.

Outra observação importante, a partir da avaliação da segunda fase da etapa 02, foi que a dosagem de PAC igual a 250mg/L foi a que proporcionou melhor eficiência de remoção

de todos os parâmetros analisados.

5.3 Resultados da terceira etapa: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação e ensaio de microfiltração

A terceira etapa foi dividida em dois ensaios. O objetivo do primeiro ensaio (ensaio 09) foi avaliar as diferenças de remoção proporcionadas pelas diferentes dosagens de polímero utilizadas e se o pós-tratamento empregado no laboratório removeria AOX e lignina além de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO. Para realização desse ensaio foi utilizada a melhor dosagem de coagulante encontrada por meio da análise dos resultados dos ensaios anteriores.

Já o objetivo do segundo ensaio (ensaio 10) foi verificar a viabilidade do emprego da microfiltração tangencial para o efluente estudado e, conjugado às membranas, estudar a alternativa de pré-tratamento feito com coagulação/floculação/sedimentação como melhoria da tratabilidade do efluente.

Khayet et al (2011) indicam o processo de coagulação/floculação/sedimentação como pré-tratamento a microfiltração para diminuir a colmatação do leito filtrante e aumentar a vida útil da membrana.

Wang et al (2011) assinalam forte tendência ao uso de microfiltração no tratamento de água de abastecimento e águas residuárias domésticas e industriais em todo o mundo. Os autores apontam a colmatação da membrana como principal problema associado a essa tecnologia e estudaram o efeito do pré-tratamento por coagulação/floculação/sedimentação como alternativa para minimizar esse problema.

5.3.1 Ensaio 09: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação para definir a melhor dosagem de polímero e avaliar a remoção de AOX e lignina

Para observar o efeito da dosagem de polímero sobre o tratamento foi escolhida a melhor dosagem de coagulante obtida até o momento (250mg/L) para ser mantida fixa enquanto a dosagem de polímero era variada. Sendo assim, foi possível verificar a influência somente da dosagem do polímero no tratamento. Além disso, foi analisado o teor de AOX e lignina no efluente bruto e tratado para verificar se o tratamento era capaz de remover esses contaminantes.

Durante o processo de produção de polpa celulósica para posterior produção de papel

deve haver a separação da celulose dos demais compostos da madeira, entre eles a lignina. Os processos de polpação levam à despolimerização e dissolução das moléculas de lignina fazendo com que o branqueamento da polpa tenha maior eficiência, já que a lignina é uma das responsáveis pela coloração marrom das polpas celulósicas. Sendo assim, nos processos de lavagem as moléculas de lignina, juntamente com os extrativos da madeira e os demais produtos químicos utilizados no processo de fabricação são levados até a estação de tratamento de efluentes (MORAIS, 2006).

Catalkaya e Kargi (2007) apontam que os principais poluentes presentes no efluente da indústria de celulose e papel são sólidos em suspensão e dissolvidos, que conferem turbidez, cor e demanda química de oxigênio elevada ao efluente além de compostos orgânicos halogenados adsorvíveis (AOX), originados da etapa de branqueamento, devido aos compostos clorados utilizados nesse processo.

Torrades et al (2003) afirmam que mesmo em plantas que utilizam processos de branqueamento livre de cloro elementar (ECF - elementary chlorine free), liberam quantidades significativas de AOX no efluente industrial.

Almeida (2002) aponta ainda que os compostos organohalogenados presentes no efluente do branqueamento da polpa celulósica, são substâncias ligadas quimicamente ao cloro, que são responsáveis por grande parte da toxidez e mutagenicidade do efluente além de serem prejudiciais às comunidades aquáticas, caso venham a ser lançados nos corpos d'água.

5.3.1.1 Caracterização do efluente usado no ensaio 09

Na primeira fase da terceira etapa houve a caracterização de dois efluentes, sendo o primeiro o efluente bruto da indústria, antes de passar pela estação de tratamento de efluentes, e o segundo o efluente coletado na saída do decantador secundário da ETE, chamado de efluente tratado na tabela 5.17, onde estão demonstrados os resultados da caracterização.

Tabela 5.17: Caracterização dos efluentes utilizados no ensaio 09

Parâmetro	Efluente	
	Bruto	Tratado
Turbidez (uT)	396	11,7
Cor aparente (uC)	3790	520
Cor verdadeira (uC)	1412	451
DQO (mg/L)	1010	208
DBO (mg/L)	592	6
ST (mg/L)	3047	1087
SST (mg/L)	1690	62
pH	7,1	7,4
Temperatura (°C)	25	26,8
NTK (mg/L)	4	2,52
Fósforo (mg/L)	1	<0,1
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,1	3,98
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	91,2	85,5
AOX	5,37	1,25
Lignina	74,8	46,5

Observou-se que nessa coleta, a ETE estava operando com eficiência de 97% de remoção de turbidez, 86,3% de remoção de cor aparente, 85,3% de remoção de cor verdadeira, 79,4% de remoção de DQO, 64,3% de remoção dos sólidos totais, 96% de remoção dos sólidos suspensos totais, além de 76% de remoção de AOX e 37,8% de remoção de lignina. Mesmo com essas eficiências elevadas, os residuais desses contaminantes ainda apresentam valores elevados, principalmente para o caso de o efluente passar numa unidade de micro ou ultrafiltração. Assim o pós-tratamento por coagulação/floculação/sedimentação foi avaliado em função da remoção desses parâmetros.

5.3.1.2 Resultados do ensaio 09: ensaio final de coagulação/floculação/sedimentação para definir a melhor dosagem de polímero e avaliar a remoção de AOX e lignina

As configurações do ensaio 09, bem como os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, AOX e lignina estão apresentados na tabela 5.18, por meio da qual foi

elaborada a figura 5.56.

Tabela 5.18: Configurações do ensaio 09 e residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, AOX e lignina após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Jarro	DC (mg/L)	DP (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)	AOX (mg/L)	Lignina (mgFenol/L)
1	250	1	2,1	75	71	77	0,51	14,7
2	250	2	1,4	61	61	76	0,46	11,7
3	250	3	3,2	67	65	73	0,34	16,5

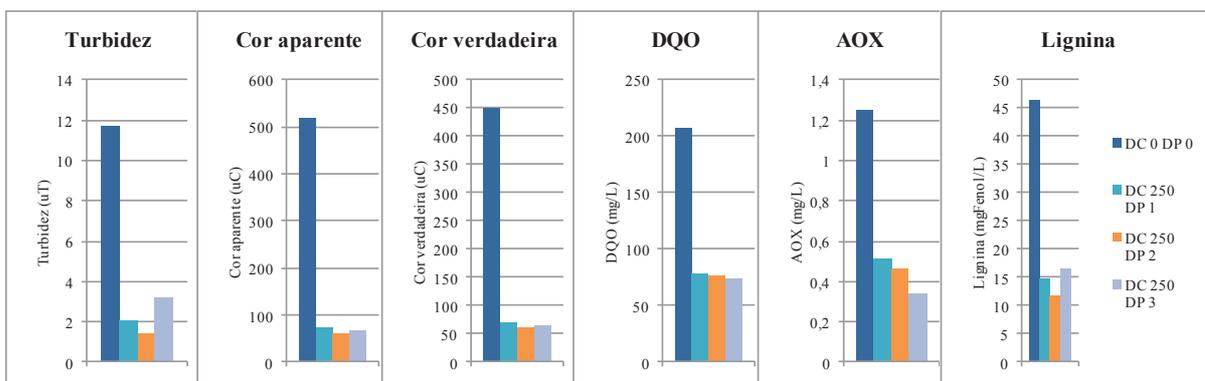


Figura 5.56: Resultado dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira, DQO, AOX e lignina, obtido no ensaio 09

Outra forma de apresentar os resultados do ensaio é por meio das eficiências percentuais de remoção dos contaminantes. Esses resultados são apresentados na figura 5.57.

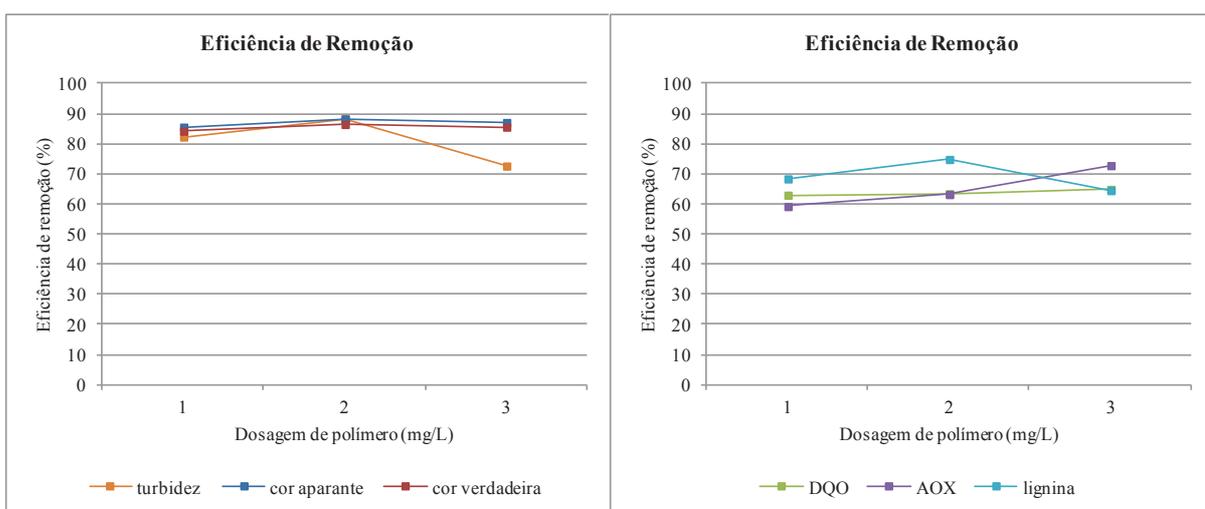


Figura 5.57: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, AOX e lignina, obtidas no ensaio 09

A remoção de cor aparente e cor verdadeira foram similares entre si, mais de 80% de remoção em todas as dosagens de polímero testada. A remoção de turbidez seguiu a mesma tendência e só apresentou resultado inferior a 80% de remoção para dosagem de 3mg/L de polímero. A remoção de cor aparente, cor verdadeira e DQO foram praticamente constantes para todas as dosagens de polímero testadas, mostrando que para a dosagem de coagulante empregada nesse ensaio, o aumento na dosagem de polímero não causou aumento na eficiência de remoção desses parâmetros.

O mesmo foi observado por Ahmad et AL (2008) que concluíram que apesar da adição de polímero ter grande relevância no tratamento, aumentando muito a remoção dos contaminantes, melhorando as características de sedimentabilidade dos flocos, além de reduzir a formação de lodo, o aumento na dosagem de polímero não é significativo ao tratamento, já que os resultados de remoção não aumentam proporcionalmente ao aumento da dosagem.

A remoção de AOX e lignina teve tendência similar até a dosagem de 2mg/L, aumentando a remoção com o aumento da dosagem. Para o novo aumento de dosagem, de 2 para 3mg/L, a remoção de AOX seguiu aumentando enquanto que a remoção de lignina decaiu. O melhor resultado para remoção de AOX e lignina foi 72,8% para 3mg/L de polímero e 74,83% para 2mg/L, respectivamente.

Catalkaya e Kargi (2007) estudaram o pós-tratamento do efluente de uma indústria de celulose e papel por meio de processos oxidativos avançados com vistas à remoção de cor, DQO e AOX. Dentre todos os processos testados pelos autores, a remoção de AOX variou de 17 a 95%, sendo a maior remoção obtida para a combinação de ozônio com peróxido de hidrogênio.

Almeida (2002) obteve 34% de remoção de AOX no pós-tratamento por ultrafiltração do efluente do processo de branqueamento da polpa, livre de cloro elementar, proveniente do estágio de extração alcalina de uma indústria de papel e celulose.

Chen et al (2003) obtiveram 52% de remoção de AOX em efluente do branqueamento de uma indústria de papel e celulose utilizando coagulação com 100mg/L de PAC e 5mg/L de polímero sintético.

Morais (2006) obteve remoção de até 92% de lignina utilizando processos oxidativos avançados com ozônio no pós-tratamento do efluente industrial alcalino de branqueamento de polpa Kraft de eucalipto e Ugurlu et al (2008) utilizaram a eletrocoagulação como tratamento desse tipo de efluente e alcançaram remoção de até 80% de lignina utilizando eletrodos de alumínio e ferro.

5.3.2 Ensaio 10: ensaio de microfiltração

Para realização da etapa de microfiltração foi feita uma coleta na ETE da indústria estudada e o efluente foi previamente tratado no laboratório por coagulação/floculação/sedimentação. A configuração utilizada para esse tratamento foi escolhida por meio da análise dos ensaios preliminares, principais e final, apresentados nos itens anteriores.

5.3.2.1 Caracterização do efluente usado no ensaio 10

Da mesma forma que no ensaio 09, no ensaio 10 houve a caracterização de dois efluentes, sendo o primeiro o efluente bruto da indústria, antes de passar pela estação de tratamento de efluentes, e o segundo o efluente coletado na saída do decantador secundário da ETE, chamado de efluente tratado. Na tabela 5.19, estão apresentados os resultados da caracterização.

Tabela 5.19: Caracterização dos efluentes utilizados no ensaio 10

Parâmetro	Efluente	Efluente
	Bruto	Tratado
Turbidez (uT)	555	94,5
Cor aparente (uC)	4110	1865
Cor verdadeira (uC)	1210	1190
DQO (mg/L)	1346	320
DBO (mg/L)	32	6
ST (mg/L)	2021	1354
SST (mg/L)	370	52
pH	7,8	7,5
Temperatura (°C)	20	20
NTK (mg/L)	NR	NR
Fósforo (mg/L)	NR	NR
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,28	6,67
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	99	90
Lignina (mgFenol/L)	89,5	58,8

*NR: não realizado

Na ocasião da coleta para realização do ensaio 10, a ETE da indústria estava operando com aproximadamente 83% de remoção de turbidez, 55% de remoção de cor aparente, 76% de remoção de DQO, 33% de remoção de sólidos totais e 34% de remoção de lignina. Para verificar se esse efluente tinha qualidade suficiente para ser filtrado na unidade de microfiltração, parte dele recebeu pré-tratamento e parte foi filtrada sem tratamento prévio. Os resultados desse ensaio são apresentados no próximo item.

5.3.2.2 Resultados do ensaio 10: ensaio de microfiltração

Foram realizadas três bateladas de ensaio na unidade piloto de microfiltração tangencial sendo a primeira com água destilada, a segunda com efluente que recebeu pré-tratamento por coagulação/floculação/precipitação e a terceira com o efluente sem pré-tratamento, ou seja, aquele coletado do decantador secundário da ETE da indústria estudada.

Os residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO e lignina, obtidos após o tratamento são apresentados na tabela 5.20. São apresentados também os demais resultados das análises realizadas nessa amostra. Ressalta-se que os resultados apresentados foram medidos na amostra composta formada pela coleta de aproximadamente um litro de sobrenadante de cada jarro e união dessas amostras em um único recipiente, sendo que as configurações operacionais empregadas foram iguais em todos os jarros.

Tabela 5.20: Resultados das análises realizadas no efluente coletado após tratamento por coagulação/floculação/sedimentação

Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)	Lignina (mgFenol/L)	pH
1,9	92	79	78	21,9	6,8
DBO (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Condutividade (µS/cm ²)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	OD
4,2	1242	1	1917	55,2	9,79

Comparando os valores iniciais apresentados na tabela 5.19 com os residuais apresentados na tabela 5.20 observa-se que o tratamento por coagulação/floculação/sedimentação proporcionou remoção de 98% de turbidez, 95% de cor aparente, 93% de cor verdadeira, 75% de DQO e 63% de lignina. Esses resultados mostram que, conforme já havia sido observado nos ensaios anteriores, o tratamento empregado apresentou bons resultados de remoção de todos os parâmetros analisados.

Stephenson e Duff (1996) pesquisaram a aplicação dos processos de coagulação e precipitação empregando sulfato de alumínio, cloreto de alumínio, sulfato de ferro e cloreto de ferro como coagulantes, em efluente combinado do branqueamento quimiotermodinâmico e termomecânico. Os autores objetivaram encontrar a faixa de operação de pH de cada coagulante e comparar as eficiências de remoção dos contaminantes obtidas por cada um desses. Similarmente ao que foi obtido nessa pesquisa, os autores concluíram que os sais de ferro e alumínio foram capazes de remover entre 90-98% da cor e da turbidez, e que esse resultado foi fortemente influenciado pelo pH.

Apesar disso, o principal objetivo do ensaio 10 não foi verificar as remoções proporcionadas pelo tratamento, já que isso foi explorado nos ensaios anteriores, e sim verificar se a aplicação desse tratamento melhoraria o fluxo de permeado durante a operação na unidade piloto de microfiltração.

Nesse sentido, para cada batelada de ensaio na unidade piloto, foi medido o volume de permeado coletado no intervalo de 30 minutos. A partir desse volume e conhecida a área da membrana (0,00465m²), foi possível calcular o fluxo de permeado em litros por hora para cada metro quadrado de membrana. Na tabela 5.21 estão apresentados os resultados para o ensaio feito com água destilada, na tabela 5.22 os resultados para o ensaio feito com o efluente que recebeu pré-tratamento e na tabela 5.23 os resultados para o ensaio feito com o efluente sem pré-tratamento.

Almeida (2002) avaliou o fluxo durante a operação de uma unidade de ultrafiltração com o efluente de indústria de papel e celulose e também com água limpa e comparou os resultados, observando queda do fluxo ao longo da operação com o efluente.

Tabela 5.21: Características da operação com água destilada na unidade piloto de microfiltração

Tempo (min)	Volume de permeado (mL)	Volume de permeado (L)	Vazão de permeado (L/h)	Fluxo de permeado (L/h.m ²)	T (°C)
0	0	-	-	-	19
30	760	0,76	1,52	320,00	21
60	870	0,87	1,74	366,32	23
90	1024	1,024	2,048	431,16	24,5
120	1095	1,095	2,19	461,05	25,5
150	1175	1,175	2,35	494,74	26
180	1220	1,22	2,44	513,68	26,5

Tabela 5.22: Características da operação com efluente que recebeu pré-tratamento na unidade piloto de microfiltração

Tempo (min)	Volume de permeado (mL)	Volume de permeado (L)	Vazão de permeado (L/h)	Fluxo de permeado (L/h.m ²)	T (°C)
0	0	-	-	-	
30	245	0,245	0,49	103,16	25
60	180	0,18	0,36	75,79	28
90	150	0,15	0,3	63,16	29
120	150	0,15	0,3	63,16	29
150	140	0,14	0,28	58,95	29
180	120	0,12	0,24	50,53	29

Tabela 5.23: Características da operação com efluente sem pré-tratamento na unidade piloto de microfiltração

Tempo (min)	Volume de permeado (mL)	Volume de permeado (L)	Vazão de permeado (L/h)	Fluxo de permeado (L/h.m ²)	T (°C)
0	0	-	-	-	23
30	780	0,78	1,56	328,42	29
60	710	0,71	1,42	298,95	28
90	710	0,71	1,42	298,95	30
120	720	0,72	1,44	303,16	31
150	650	0,65	1,3	273,68	32
180	650	0,65	1,3	273,68	32

A partir do cálculo do fluxo de permeado de cada batelada foi possível comparar se houve diminuição desse fluxo durante a filtração do efluente com e sem pré-tratamento. Essa comparação entre os fluxos está demonstrada na figura 5.58.

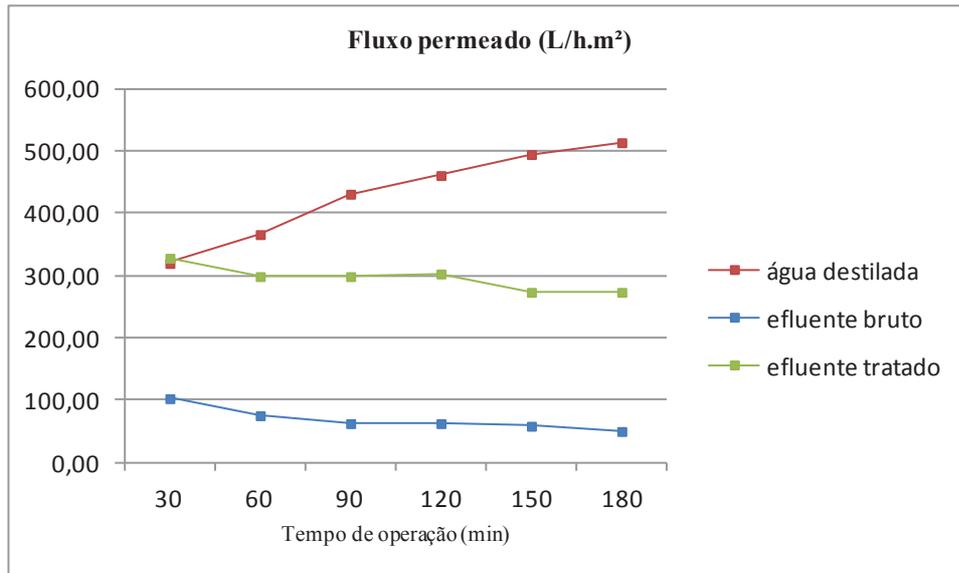


Figura 5.58: Fluxo do permeado durante a operação na unidade piloto de microfiltração tangencial

Observou-se que ao longo dos 180 minutos o fluxo da água destilada aumentou. Isso ocorre devido ao aumento da temperatura ao longo da operação, que diminui a viscosidade da água e facilita a passagem da mesma através dos poros da membrana. Para as demais operações, para os dois efluentes filtrados, com e sem pré-tratamento, esse fluxo diminuiu ao longo do tempo devido ao entupimento de parte dos poros, causado pela deposição de material sobre e entre os poros do leito filtrante. Nota-se, no entanto, que o fluxo do efluente que foi previamente tratado foi maior que o fluxo do efluente sem pré-tratamento. Ao final da operação, o fluxo do efluente que passou pelo pré-tratamento foi igual a 275,78L/h.m² enquanto que o fluxo do efluente bruto foi igual a 50,53L/h.m².

Durante toda a operação, além de medir o volume de permeado para calcular o fluxo, eram feitas análises de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO, para verificar se haveria remoção desses parâmetros pela microfiltração, além das demais análises propostas na metodologia. Os resultados das análises realizadas nas amostras de permeado coletadas a cada 30 minutos de operação com efluente sem pré-tratamento são apresentados na tabela 5.24. Já na tabela 5.25 são apresentados os resultados das análises que foram feitas somente na amostra composta, formada pela união de todas as amostras de permeado coletadas.

Tabela 5.24: Residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO e resultados das demais análises após tratamento por microfiltração do efluente sem pré-tratamento

Tempo (min)	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	Alcalinidade (mgCaCO_3/L)
0	-	-	-	-	-	-	-
30	11,4	383	302	128	8,2	1264	68,25
60	10,3	370	311	116	8,42	1302	74,25
90	12	356	318	112	8,48	1338	72
120	11,1	355	316	108	8,48	1252	60,75
150	11,4	357	288	111	8,6	1325	67,13
180	7,54	324	255	102	8,53	1294	55,88

Tabela 5.25: Resultados das análises realizadas na amostra composta após tratamento por microfiltração do efluente sem pré-tratamento

Tempo (min)	ST (mg/L)	DBO (mg/L)	Lignina (mgFenol/L)
180	818	5	23,5

A passagem do efluente do decantador secundário pela membrana proporcionou melhoria na qualidade deste, já que removeu turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO. Na figura 5.59 estão apresentados os resultados de remoção desses parâmetros no permeado coletado durante a operação com o efluente bruto.

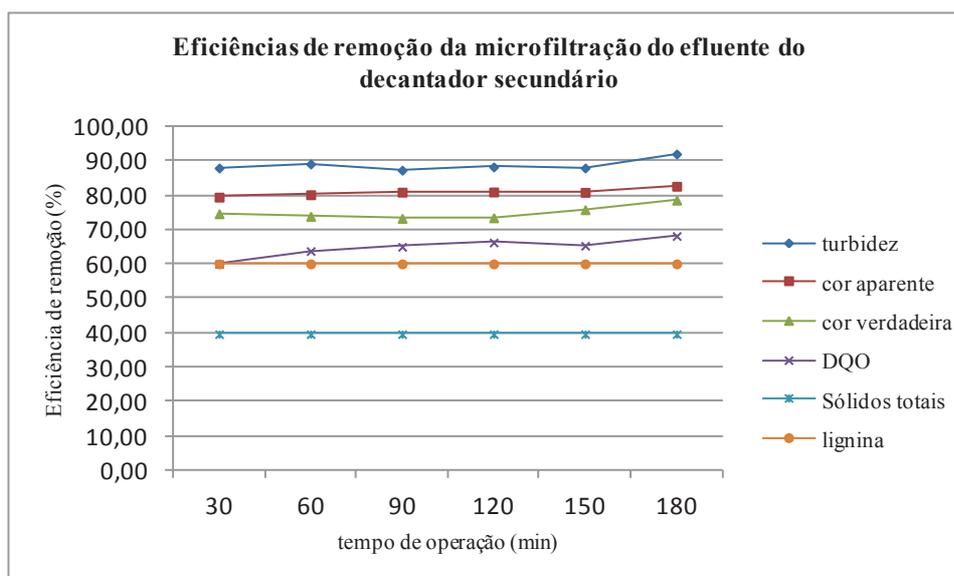


Figura 5.59: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina, obtidas na microfiltração do efluente bruto, no ensaio 10

A microfiltração levou a bons resultados de remoção dos parâmetros analisados. Houve remoção de praticamente 90% de turbidez, 80% de cor aparente, 75% de cor verdadeira, 65% de DQO, 60% de lignina e 40% de sólidos totais. No entanto, o fluxo dessa operação foi baixo quando comparado ao fluxo da operação com efluente pré-tratado por coagulação/floculação/sedimentação. Isso significa que houve entupimento dos poros durante e filtração desse efluente.

Todo esse roteiro de análises foi realizado para as amostras de permeado e para a amostra composta, coletadas durante a operação da microfiltração do efluente tratado previamente por coagulação/floculação/sedimentação. Os resultados dos residuais de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO e das demais análises realizadas nas amostras de permeado coletadas a cada 30 minutos de operação e na amostra composta, são apresentados nas tabelas 5.26 e 5.27, respectivamente.

Tabela 5.26: Residuais de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO e resultados das demais análises após tratamento por microfiltração do efluente previamente tratado

Tempo (min)	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	Cor verdadeira (uC)	DQO (mg/L)	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$)	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)
0	-	-	-	-	-	-	-
30	1,6	87	81	74	7,7	1529	39,6
60	1,1	92	92	70	7,7	1728	56,7
90	1,1	103	97	85	8	1773	48
120	1,1	110	104	103	8,2	1787	48,6
150	1,5	123	106	88	8,4	1792	48,6
180	1,6	128	118	106	8,5	1783	41,7

Tabela 5.27: Resultados das análises realizadas na amostra composta após tratamento por microfiltração do efluente previamente tratado

Tempo (min)	ST (mg/L)	DBO (mg/L)	Lignina (mgFenol/L)
180	1105	3	15,9

As remoções obtidas pela microfiltração do efluente tratado previamente por coagulação/floculação/sedimentação está apresentada na tabela 5.28.

Tabela 5.28: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina

Eficiências de remoção (%)							
Tempo (min)	Turbidez	Cor aparente	Cor verdadeira	DQO	ST	DBO	Lignina
30	16,13	5,43	-2,53	5,13	NR	NR	NR
60	40,86	0,00	-16,46	10,26	NR	NR	NR
90	42,47	-11,96	-22,78	-8,97	NR	NR	NR
120	39,25	-19,57	-31,65	-32,05	NR	NR	NR
150	18,82	-33,70	-34,18	-12,82	NR	NR	NR
180	11,83	-39,13	-49,37	-35,90	NR	NR	NR
Composta	NR	NR	NR	NR	11,03	28,10	27,40

*NR: Não realizado

A microfiltração do efluente tratado previamente por coagulação/floculação/sedimentação permitiu reduzir ainda mais a turbidez, já que houve remoção de até 42% desse parâmetro além dos 98% que já havia sido obtido somente com o pré-tratamento.

Já a remoção de cor e DQO não foram tão eficientes quanto a remoção de turbidez, mostrando que a membrana de microfiltração apresentou maior facilidade em remover material particulado, de maior dimensão, do que material dissolvido, responsável por conferir cor. A remoção de cor poderia ser melhorada com aplicação de processos oxidativos avançados. Destaca-se que o fluxo da operação desse efluente tratado previamente foi muito maior que o fluxo do efluente sem pré-tratamento. Isso mostrou que, nesse caso, o entupimento dos poros foi menor, ou seja, houve menor colmatação do leito filtrante.

Contudo, mesmo com esse leve aumento de cor e DQO no efluente filtrado, o conjunto coagulação/floculação/sedimentação ainda apresentou remoções elevadas dos parâmetros analisados e os resultados dessas remoções são apresentados na figura 5.60.

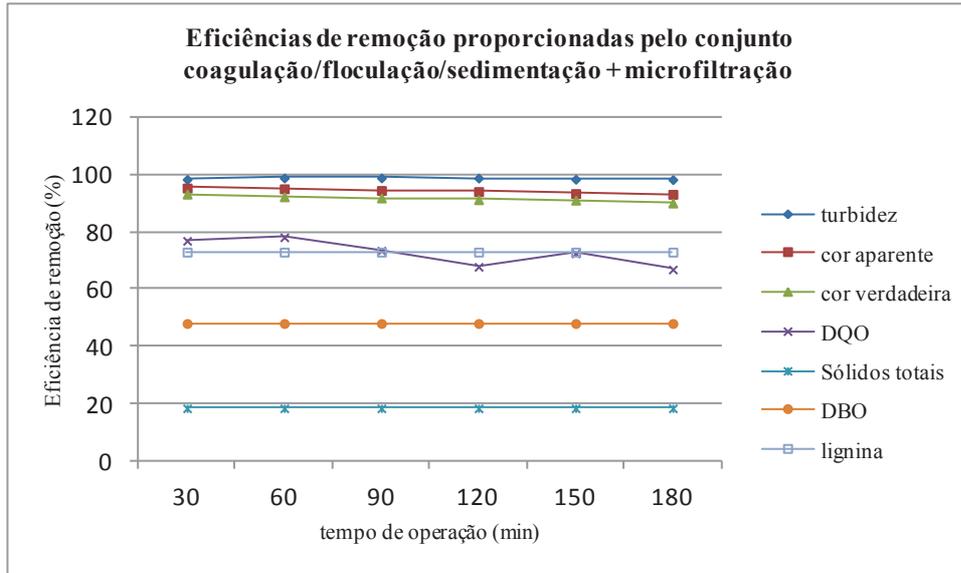


Figura 5.60: Resultados das remoções de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, ST, DBO e lignina, obtidas pelo conjunto coagulação/floculação/sedimentação conjugado à microfiltração, no ensaio 10

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados no capítulo anterior obtidos nas diversas etapas desta pesquisa, chegaram-se às seguintes conclusões:

- O efluente industrial, ao contrário do efluente sanitário, apresentou particularidades, sendo difícil a definição prévia de quais seriam as respostas para cada condição operacional empregada. Além disso, o efluente apresentou pouca homogeneidade ao longo do tempo de observação dessa pesquisa, o que dificultou o estabelecimento de condições ótimas de operação do tratamento empregado no laboratório.
- Os ensaios preliminares de coagulação/floculação/sedimentação mostraram que o coagulante utilizado individualmente não apresentou bons resultados de remoção dos contaminantes, sendo necessária a adição de um polímero como auxiliar de floculação.
- Ao longo dos ensaios preliminares foi possível concluir também que as velocidades de sedimentação tiveram menos influência na eficiência do tratamento do que as dosagens de coagulante e polímero.
- Dentre os três polímeros aniônicos testados o que proporcionou melhores resultados de remoção de turbidez, cor aparente e DQO foi o PRAESTOL 2540, cuja faixa de operação de pH indicada pelo fabricante é entre 06 e 10 e o pH de coagulação obtido nos ensaios com esse polímero estiveram dentro dessa faixa.
- Houve significativa melhora nas características de sedimentabilidade do lodo nas configurações em que foi utilizado coagulante combinado com polímero. Isso foi observado por meio da redução do valor do IVL dessas amostras, sendo que, naquelas em que só havia aplicação de coagulante o IVL atingiu valores superiores a 100mL/g, sendo classificado como lodo de sedimentabilidade média e naquelas onde havia adição de polímero juntamente com o coagulante o IVL baixou para até 12,51mL/g, sendo classificado como lodo de ótima sedimentabilidade.
- De acordo com os resultados obtidos na segunda fase da etapa 02 foi possível concluir que não havia necessidade do emprego de 10 minutos de floculação uma vez que o tempo de 07 minutos levou a bons resultados de remoções de turbidez, cor e DQO. No entanto, na tentativa de aperfeiçoar ainda mais o tratamento, o tempo de floculação foi diminuído para 05 minutos e, nesse caso, não ocorreram bons resultados de remoção dos parâmetros analisados. Concluiu-se então que o melhor tempo de floculação para o caso estudado foi de 07 minutos.

- Concluiu-se também que a dosagem de 250mg/L de PAC, combinado com polímero é a mais eficiente em termos de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira e DQO. Quando não houve aplicação de polímero como auxiliar de coagulação o tratamento não foi eficiente, os flocos não foram formados na fase de floculação e, por conseguinte, não houve boa clarificação do sobrenadante na etapa de sedimentação.
- Quando da aplicação da melhor dosagem de coagulante obtida com variação somente da dosagem de polímero, condição que foi testada no último ensaio de coagulação/floculação/sedimentação, foi possível concluir que a menor dosagem de polímero empregada foi efetiva na remoção de todos os parâmetros analisados, sendo que o aumento dessa dosagem não causa aumento proporcional nessas eficiências de remoção.
- A melhor condição operacional, definida pelos ensaios de coagulação/floculação/sedimentação foi a combinação de 250mg/L de polímero com 1mg/L de polímero aniônico. Essa configuração proporcionou remoção de 98% de turbidez, 95% de cor aparente, 93% de cor verdadeira e 75% de DQO.
- Além desses parâmetros, que foram monitorados ao longo de todas as etapas da pesquisa, houve remoção de 60% de AOX e 70% de lignina, demonstrando que o tratamento empregado foi eficiente também na remoção desses compostos.
- A unidade piloto de microfiltração tangencial melhorou a qualidade final do efluente da indústria de papel e celulose empregada. Houve remoção de 90% de turbidez, 80% de cor aparente, 75% de cor verdadeira, 65% de DQO, 60% de lignina e 40% de sólidos totais. No entanto, o fluxo de filtração dessa operação foi baixo.
- A aplicação de pré-tratamento por coagulação/floculação/sedimentação aumentou o fluxo de filtração na unidade piloto de microfiltração. O fluxo da filtração do efluente previamente tratado foi 275,78L/h.m² enquanto o fluxo da filtração do efluente que não recebeu pré-tratamento foi de 50,53L/h.m². Isso mostrou que o pré-tratamento por coagulação/floculação/sedimentação é eficiente na diminuição da colmatação da membrana ao longo da operação, permitindo um bom fluxo de operação.
- A microfiltração do efluente previamente tratado proporcionou ainda remoção de até 40% da turbidez remanescente, que já apresentava um valor bastante reduzido devido ao pré-tratamento empregado.
- O conjunto coagulação/floculação/sedimentação conjugado à microfiltração proporcionou ótimos resultados para remoção de turbidez, cor, DQO, sólidos totais,

DBO e lignina. Ao longo da operação, o residual de turbidez chegou a valores próximos de 1uT, a cor aparente remanescente foi próxima de 100uC e o residual de DQO chegou a 70mg/L, sendo que isso representou remoção de 78% em relação a amostra bruta, coletada na ETE da indústria.

Por acreditar-se que o tratamento físico-químico de efluentes industriais tende a se difundir, mas que ainda necessita de investigações, ficam as seguintes sugestões para pesquisas posteriores:

- O polímero aniônico apresentou bons resultados na remoção dos parâmetros observados, no entanto, por existir uma grande variedade de polímeros disponíveis no mercado, sugerem-se novos trabalhos com aplicação de polímeros diferentes.
- Pesquisar além dos polímeros sintéticos, polímeros naturais, que podem ter bons resultados com menores custos, além de possíveis melhorias nos aspectos ambientais.
- Avaliar os custos da implantação do pós-tratamento estudado nessa pesquisa para discutir a respeito da viabilidade do emprego deste em escala real.
- Estudar possíveis formas de reúso do efluente gerado a partir das tecnologias empregadas e avaliar o impacto econômico e ambiental dessa alternativa.
- Testar a microfiltração do efluente previamente tratado com outras configurações operacionais de coagulação/floculação/sedimentação, para avaliar o desempenho da operação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, Anuário Estatístico da ABRAF 2010, ano base 2009.

Disponível em: < <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF10-BR/controle.html> >

AHMAD, A. L.; WONG, S.S.; TENG, T.T.; ZUHAIRI, A. Improvement of alum and PACl coagulation by polyacrylamides (PAMs) for the treatment of pulp and paper mill wastewater. *Chemical Engineering Journal*, v. 137, p. 510–517, 2008.

AGUILAR, M. I. SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F.; MESEGUER, V.; FUENTES, A. Improvement of coagulation–flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid, *Chemosphere*, v. 58, n. 1, p. 47-56, 2005.

ALMEIDA, K. M. Tratamento do efluente alcalino no branqueamento da polpa de celulose pelo processo de separação por membranas. 2002. 139 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2002.

AL-MALACK, M. H.; ABUZOID, N. S.; EL-MUBARAK, A. H. Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory, *Water Research*, v. 33, n. 2, p. 521-529, 1999.

AMOO, I. A.; AMUDA, O. S. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 141, p. 778-783, 2007.

APHA (1999). American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. 20ed. Washington: American Public Health Association, 1999.

AZEVEDO NETTO, J. M.. Técnicas de Abastecimento e Tratamento de Água. São Paulo, CETESB, 1987. 319p.

BERTAZZOLI, R.; PELEGRINI, R. Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico. *Quimica Nova*, v. 25, n. 3, p. 477-482, 2002.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel, Relatório anual 2008/2009. Disponível em: < <http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/anual/rel2008.pdf> >

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel, Relatório anual 2010/2011. Disponível em: < <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2010.pdf> >

BOLTO, B.; GREGORY, J. Organic polyelectrolytes in water treatment, *Water Research*, v. 41, n. 11, p. 2301-2324, 2007.

BUYUKKAMACI, N.; KOKEN, E. Economic evaluation of alternative wastewater treatment plant options for pulp and paper industry. *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 6070–6078, 2010.

CAMPOS, J. R.; POVINELLI, J. Coagulação e floculação. In: NETTO, J. M. A. Técnica de abastecimento e tratamento de água. São Paulo. Cetesb, 1979. p. 91-129.

CATALKAYA, E. C.; KARGI, F. Color, TOC and AOX removals from pulp mill effluent by advanced oxidation processes: a comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, v. 139, p. 244-253. 2007.

CETESB – Companhia de tecnologia de saneamento ambiental, Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose – série P + L. 2008.

CHEN, Y.; ZHAN, H.; CHEN, Z.; FU, S. Study on the treatment of the sulfite pulp CEHbleaching effluents with the coagulation–anaerobic acidification–aeration package reactor. *Water Research*, v. 37, p. 2106 – 2112. 2003.

CHOI, K. Y.; DEMPSEY, B. A. In-line coagulation with low-pressure membrane filtration, *Water Research*, Volume 38, Issue 19, November 2004, Pages 4271-4281

DECAROLIS, J.; HONG, S.; TAYLOR, J. Fouling behavior of a pilot scale inside-out hollow fiber UF membrane during dead-end filtration of tertiary wastewater. *Journal of Membrane Science*, v. 191, n. 1–2, p. 165-178, 2001.

DI BERNARDO, L. Métodos e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro, RJ: ABES: Rima, 1993. v. 1.

DI BERNARDO, L. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Sao Carlos, SP: ABES : Rima, 2003. 498 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro, RJ: ABES: Rima, 2005. v. 1.

DOMÍNGUEZ, J. R.; GONZÁLEZ, T.; GARCÍA, H. M.; SÁNCHEZ-LAVADO, F.; HEREDIA, J. B. Aluminium sulfate as coagulant for highly polluted cork processing wastewaters: Removal of organic matter, *Journal of Hazardous Materials*, v. 148, p 15-21, 2007.

FABRETI, A. A. Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico-químico. 2006. 179 p. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2006.

FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 317-323, 2009.

FIELD, R. W.; WU, D.; HOWELL, J. A.; GUPTA, B. B. Critical flux concept for microfiltration fouling. *Journal of Membrane Science*, v. 100, p. 259-272, 1995.

GABELICH, C.J., YUN, T.I., COFFEY, B.M., SUFFET, I.H. Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance. *Desalination*, v. 150, p. 15–30, 2002.

GANJIDOUST, H.; TATSUMI, K.; YAMAGISHI, T.; GHOLIAN, R. N. Effect of synthetic and natural coagulant on lignin removal from pulp and paper wastewater, *Water Science and Technology*, v. 35, p. 291-296, 1997.

INTERNATIONAL STANDARD ISO 9562:2004. Water quality – Determination of Adsorbable Organically Bound Halogens (AOX). 3rd Edition. ISO copyright office. Switzerland, 2004.

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. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 117-126, 2007.

JORDÃO, E. P.; SANTOS, V. M. M.; CONCEIÇÃO, J. R.; SOBRINHO, P. A. Determinação do índice volumétrico de lodo numa concentração padrão. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997. Foz do Iguaçu. Anais. Rio de Janeiro, ABES. 1997. p. 637-645.

JUDD, S. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*. Editora Elsevier. 2006

KHAYET, M.; ZHRIM, A. Y.; HILAL, N. Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, v. 167, p. 77–83. 2011.

KO, C. H.; FAN, C. Enhanced chemical oxygen demand removal and flux reduction in pulp and paper wastewater treatment using laccase-polymerized membrane filtration. *Journal of Hazardous Materials*, v. 181, p. 763–70, 2010.

KOROS, W. J.; MA, Y. H.; SHIMIDZU, T. Terminology of membranes and membrane process; IUPAC recommendation. *Journal of membrane science*, v. 120, p. 149-159, 1996.

LAUTENSCHLAGER, S. R. Otimização do processo de ultrafiltração no tratamento avançado de efluentes e águas superficiais. São Paulo, 2006. 226 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo – SP.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3 ed. Campinas: Editora Átomo, 2005. 493 p.

MARGUTI, A. L.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. Otimização de processos físico-químicos na remoção De fósforo de esgotos sanitários por processos de precipitação química com cloreto férrico. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 395-404, 2008.

MATTOS, R. L. G., VALENÇA, A. C. V. A reestruturação do setor de papel e celulose. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 10, p. 253-268, set. 1999

MEDEIROS, D. R. Tratamento de efluentes do branqueamento da polpa celulósica por processos oxidativos avançados baseados em ozônio. São Carlos, 2008. 223 p. Tese (Doutorado) – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. 2008.

MENDES, C. G. N. Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis. 1989. 244 p., 2 v. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 1989.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. 4.ed., McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Água na indústria: uso racional e reúso. São Paulo: Oficina de textos, 2005. 143 p.

MORAIS, A. A. Uso de ozônio como pré e pós-tratamento de efluentes da indústria de celulose kraft branqueada. 2006. 110 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2006.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da madeira de pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.461-470, 2005.

MOUNTEER, A. H.; MOKFIENSKI, J. J.; AMORIM, F. R. Remoção de matéria orgânica recalcitrante de efluentes de celulose kraft de branqueamento por ozonólise. O papel, São Paulo, v. 66, n. 3, p. 64-70, 2005.

NORDIN, A. K., JÖNSSON, A. S. Case study of an ultrafiltration plant treating bleach plant effluent from a pulp and paper mill. Desalination, v. 201, p. 277-289, 2006.

OENNING JUNIOR, A. Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica. 2006. 248f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2006.

OLIVEIRA, C. R. Aplicação da ultrafiltração na reciclagem de água na indústria de celulose e papel. 2003. 73 p. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. 2003.

PIOTTO, Z. C. Eco-eficiência na indústria de celulose e papel – estudo de caso. São Paulo, 2003. 379 p. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo – SP.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos. São paulo: ABES, 2005. 285 p.

PEPE, L.; SARAIVA, F. Setor de cellulose e papel – visão panorâmica sobre momento e perspectivas. Revista O Papel, p. 40-49, Abril de 2004.

POKHREL, D.; VIRARAGHAVAN, T. Treatment of pulp and paper mill wastewater: a review. Science of Total Environmental, n. 333, p. 37-58, 2004.

QIAN, J. W.; XIANG, X. J.; YANG, W. Y.; WANG, M.; ZHENG, B. Q. Flocculation performance of different polyacrylamide and the relation between optimal dose and critical concentration, European Polymer Journal, v. 40, p. 1699-1704, 2004.

QUARTAROLI, L. Aplicação da flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluente de lodos ativados. 2012. 112 p. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati – PR.

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

ROUT, D.; VERMA, R.; AGARWAL, S. K. Polyelectrolyte treatment: an approach for water quality improvement, *Water Science and Technology*, v. 40, n. 2, p. 137-141, 1999

RIBEIRO, F. L. M. Quantificação e caracterização química da ETA Itabirito – MG. 2007. 134f. Dissertação de mestrado. Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto-MG. 2007.

SANTOS, H.R. Aplicação de coagulantes no afluente de reator anaeróbio de leite expandido alimentado com esgoto sanitário. 2001. 166 p. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - SP. 2001.

SENA, R. F. Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes de indústria de carnes para geração de energia. 2005. 94 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Faculdade de Engenharia Química, Florianópolis - SC. 2005.

STEPHENSON, R. J.; DUFF, S. J. B. Coagulation and precipitation of a mechanical pulping efluente - I. Removal of carbon, colour and turbidity. *Water Research*, v. 30, n. 44, p. 781 – 792. 1996.

TAMBOSI, J. L. Remediação de efluente da indústria de papel e celulose por processos oxidativos avançados e coagulação férrica. Florianópolis, 2005. 131 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos.

THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C. F. The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. *Bioresource Technology*, v. 77, n. 3, p. 275-286, 2001.

TORRADES, F.; PÉREZ, M.; MANSILLA, H. D.; PERAL, J. Experimental design of Fenton and photo-Fenton reactions for the treatment of cellulose bleaching effluents, *Chemosphere*, v. 53, p. 1211-1220. 2003.

UĞURLU, M.; GÜRSES, A.; DOĞAR, Ç.; YALÇIN, M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation, *Journal of Environmental Management*, v. 87, n. 3, p. 420 - 428. 2008.

VIDAL, C. M. Avaliação da microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente gerado em sistema de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator UASB (upflow anaerobic sludge blanket) seguido de tanque de aeração. 2006. 213 p. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2006.

VIEIRA, R. B. Estudo da coagulação de cultura mista utilizada na biodegradação de efluente de terminais de combustíveis. 2009. 108 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG. 2009.

VIVEIROS, L. S. Tratamento físico-químico de efluente de uma usina de reciclagem de plástico de Campo Grande - MS. 2008. 72 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande – MS. 2008.

VON SPERLING, M. V. Dimensionamento de lodos ativados por batelada. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 6, p. 147-156, 2001.

WALKER, P.; KELLEY, T. Solids, organic load and nutrient concentration reduction in swine waste slurry using a polyacrylamide (PAM)- aided solids flocculation treatment, Bioresources Technology, v. 90 , p. 151-158, 2003.

WANG, S.; LIU, C.; LI, Q. Fouling of microfiltration membranes by organic polymer coagulants and flocculants: Controlling factors and mechanisms. Water Research, v. 45, p. 357-365. 2011.

WONG, S.S; TENG, T.T; AHMAD, A.L.; ZUHAIRI, A.; NAJAFPOUR, G. Treatment of paper and pulper mill wastewater by polyacrylamide (PAM) in polymer induced flocculation, Journal of Hazardous Materials, v. 135, p. 278-378. 2006

ZHANG, Y.; MA, C.; YE, F.; KONG, Y.; LI, H. The treatment of wastewater of paper mill with integrated membrane process. Desalination, n. 236, p. 349-356, 2009.

ZHONG, J.; SUN, X.; WANG, C. Treatment of oily wastewater produced from refinery process using flocculation and ceramic membrane filtration, Separation and Purification Technology, v. 32, p. 93-98. 2003.