



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente**

Lindsay Iara Pegoraro Baccarin

Pós-tratamento físico-químico de efluente sanitário para remoção de fósforo

Passo Fundo
2011

Lindsay Iara Pegoraro Baccarin

Pós-tratamento físico-químico de efluente sanitário para remoção de fósforo

Orientador: Professor Marcelo Hemkemeier, Doutor.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo

2011

Lindsay Iara Pegoraro Baccarin

Pós-tratamento físico-químico de efluente sanitário para remoção de fósforo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de aprovação: Passo Fundo, 03 de março de 2011.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Marcelo Hemkemeier, Doutor.
Orientador

Oswaldo Luis Vieira Faria, Doutor.
Universidade Católica de Pelotas

Vandré Barbosa Brião, Doutor.
Universidade de Passo Fundo

Vera Maria Cartana, Doutor.
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo
2011

Dedicatória

*Aos meus grandes amores
Sidnei e Gemma (em memória).*

Agradecimentos

Ao meu esposo Sidnei, que soube entender e aceitar a minha ausência familiar durante o período dedicado ao desenvolvimento prático desta pesquisa. Obrigada meu companheiro fiel, meu melhor amigo, por todo o amor, incentivo e dedicação! Tudo valeu a pena por você estar ao meu lado!

A minha mãe Gema (em memória) que foi a inspiração e o incentivo para minha trajetória acadêmica. “Mais uma etapa vencida, fiz por mim e por você! Essa não será a última, mas apenas uma das muitas que virão.”

Aos meus amigos, obrigada por todo carinho e incentivo. Em especial a amiga Cassiana Machado que me acolheu com amor e carinho em seu lar durante o período de realização da parte prática desta pesquisa. Obrigada Cassi por tudo! Você foi e sempre será uma grande amiga!

As estagiárias do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental Andreia Derossi, Andressa Decesaro e Elisandra Fabris que me auxiliaram no árduo trabalho prático desta pesquisa. Meus sinceros agradecimentos, em especial pelas manhãs frias de inverno, as quais deixaram o aconchego de seus lares e estiveram ao meu lado.

A todos os colegas do Mestrado pela excelente relação pessoal que criamos. Em especial aos colegas e amigos Rosdaéli Ceconello Menegaz, Marcelo Lacortt, Daniel Hecktheuer e Luis Antonio Teixeira Raguzoni pelos bons e alegres momentos de convivência que tivemos no período do curso. Obrigada pela verdadeira amizade, que nossos laços de amizade perdurem e sejam eternos. Sucesso aos meus amigos Mestres!

À Dra. Silvia Sargenti, amiga dedicada, que me auxiliou mesmo a distância e contribuiu com informações importantes ao desenvolvimento da parte analítica desta pesquisa. Obrigada pelo auxílio e pela dedicação.

Ao professor Dr. Marcelo Henkemeier, orientador desta dissertação, pela proposta do tema e pela participação nas sugestões de melhorias ao presente trabalho.

Aos professores Dr. Osvaldo Luis Vieira Faria, Dra. Vera Maria Cartana Fernandes e Dr. Vandr e Barbosa Brião por aceitarem participar da Banca de Defesa desta Disserta o, proporcionando sugestões e críticas construtivas que serviram para o enriquecimento deste trabalho.

Aos funcionários das unidades acad micas, às quais estive envolvida durante o período de dedica o ao mestrado. Aos professores e coordenadores que de alguma forma contribuíram para a realiza o desta pesquisa. Aos auxiliares de laboratório João Carlos Barcelos Farezine e Audali Spode Padilha que se dedicaram ao meu auxílio durante a parte prática desta pesquisa. As secret rias das unidades V nia Cristina Bacega, Mariângela da Silva e V nia Miranda da Silva que sempre me receberam com gentileza e aten o. A química Maritania Morgan e a Vanessa Carpes do Setor de Saneamento Ambiental pelas informa es sobre a ETE gentilmente cedidas. As funcionárias Nadir, Marcia e Rosi que sempre se dedicaram em manter o ambiente de trabalho limpo e organizado nas unidades, e a querida Nara que fazia com carinho o café para os nossos lanches. Obrigada, todos foram importantes!

A CAPES pela concessão de bolsa.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que essa etapa fosse cumprida.



Fonte: www.google.com.br/imagens

*Não corra atrás das
borboletas...*

*Cuide do seu jardim que
elas virão até você!*

*Dê o que você tem de
melhor e a vida lhe retribuirá!*

(Adaptado de Mário Quintana)

RESUMO

Os efluentes sanitários, mesmo após tratamento primário e secundário, ainda podem conter matéria orgânica e nutrientes como o fósforo. Estes vêm causando impacto negativo quando lançados em corpos hídricos receptores por seu acúmulo no ambiente aquático, interferindo no ciclo biológico natural. Neste contexto, vem sendo amplamente estudado a utilização de tecnologias alternativas, como processos físico-químicos, entre eles a coagulação seguida de floculação e posterior sedimentação, para o pós-tratamento destes efluentes, antes que os mesmos sejam descartados nos corpos hídricos receptores. Este trabalho teve como principais objetivos: a quantificação das diferentes formas de fósforo existentes no efluente sanitário e o estudo do tratamento físico-químico por floculação e sedimentação com o uso de sais inorgânicos (cloreto férrico, sulfato de alumínio, óxido e cloreto de cálcio), como uma alternativa após o tratamento biológico convencional da ETE da Universidade de Passo Fundo. Os resultados desta pesquisa mostram que as formas solúveis do fósforo são as formas predominantes no efluente sanitário final. A quantificação das diferentes frações de fósforo possibilitou a avaliação individual das eficiências de cada coagulante utilizado e suas diferentes concentrações. As maiores remoções de fósforo total foram obtidas utilizando-se do coagulante cloreto férrico na concentração de 250 mg/L. Nestas condições o fósforo total inicial passou de 16 mg/L para 3 mg/L após o tratamento. O coagulante sulfato de alumínio apresentou eficiências próximas ao cloreto férrico. Com a minimização da matéria orgânica e nutrientes como o fósforo, o pós-tratamento para o efluente sanitário contribuirá de maneira a um despejo menos impactante no corpo hídrico receptor.

Palavras-chaves: Tratamento físico-químico, efluente sanitário, ETE de Universidade.

ABSTRACT

The wastewater, even after primary and secondary treatment, may contain organic matter and nutrients such as phosphorus. Which are causing negative impact when released in water body receptors by their accumulation in the aquatic environment, interfering with the natural biological cycle. In this context, alternative effluent technologies are being extensively studied such as physical-chemical processes including coagulation followed by flocculation and subsequent sedimentation as post-treatment of effluents before their discarding in water body receptors. The main goals of this work were quantification of different forms of phosphorus and the study of physical-chemical treatment by flocculation and sedimentation using inorganic salts (ferric chloride, aluminum sulfate, calcium oxide and calcium chloride), as an alternative after the conventional biological treatment, in the wastewater sanitary ETE of the Passo Fundo University. The results showed that the soluble phosphorous forms are the main forms in the final sanitary effluent. The quantification of these different phosphorous fractions facilitates the evaluation of each coagulant agent used in the different concentrations. The ferric chloride at concentration of 250 mg/L showed the best total phosphorous remotion taxes. At this concentration the total phosphorous concentration decreased from 16 mg/L to 3 mg/L after the treatment. The aluminum sulfate showed efficiency similar to ferric chloride. The minimization of the organic matter and nutrients such as phosphorous at the sanitary effluent by use of this post treatment will contribute with a less impacting effluent deposition.

Keywords: Physical-chemical treatment, wastewater sanitary, University of ETE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O Ciclo do fósforo.....	22
Figura 2: Ânions do fósforo	22
Figura 3: ETE da Universidade de Passo Fundo.....	30
Figura 4: Planta baixa da ETE da Universidade de Passo Fundo.....	31
Figura 5: Etapas da ETE da Universidade de Passo Fundo.....	32
Figura 6: Equipamento Jart-Test.....	34
Figura 7: Resumo da obtenção das formas fracionadas do fósforo.....	36
Figura 8: Caracterização do efluente tratado da ETE da Universidade de Passo Fundo.....	38
Figura 9: Caracterização para as diferentes formas de P-Total.....	40
Figura 10: Caracterização para as diferentes formas de Ortofosfatos Reativos.....	41
Figura 11: Caracterização para as diferentes formas de Polifosfatos.....	41
Figura 12: Caracterização para as diferentes formas de Fósforo Orgânico.....	42
Figura 13: Fotos do tratamento físico-químico para o cloreto férrico:.....	43
Figura 14: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico.....	44
Figura 15: Análises após tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico.....	45
Figura 16: Fotos do tratamento físico-químico para o sulfato de alumínio.....	47
Figura 17: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio.....	48
Figura 18: Análises após tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio.....	49
Figura 19: Fotos do tratamento físico-químico para o óxido de cálcio.....	51
Figura 20: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio.....	51
Figura 21: Análises após tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio.....	52
Figura 22: Fotos do tratamento físico-químico para o cloreto de cálcio.....	55
Figura 23: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio.....	55
Figura 24: Análises após tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio.....	56
Figura 25: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico.....	58
Figura 26: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico.....	61
Figura 27: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio.....	65
Figura 28: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio.....	67
Figura 29: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio.....	71
Figura 30: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio.....	73
Figura 31: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio.....	77
Figura 32: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio.....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição do esgoto doméstico.....	15
Quadro 2 : Formas e terminologia do fósforo.....	24
Quadro 3: Resumo metológico das análises.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites estabelecidos para Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio e Sólidos Suspensos, de acordo com a vazão do efluente.....	20
Tabela 2: Limites estabelecidos para Fósforo de acordo com a vazão do efluente.....	21
Tabela 3: Espécies iônicas de fosfato presentes em solução em diferentes valores de pH.....	23
Tabela 4: Resumo esquemático do tratamento físico-químico.....	34
Tabela 5: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (FeCl ₃).....	62
Tabela 6: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (FeCl ₃).....	62
Tabela 7: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (FeCl ₃).....	63
Tabela 8: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico (FeCl ₃).....	63
Tabela 9: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (FeCl ₃).....	64
Tabela 10: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	68
Tabela 11: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	68
Tabela 12: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	69
Tabela 13: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	69
Tabela 14: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	70
Tabela 15: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (CaO).....	74
Tabela 16: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (CaO).....	74
Tabela 17: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (CaO).....	75
Tabela 18: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico (CaO).....	75
Tabela 19: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (CaO).....	76
Tabela 20: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (CaCl ₂).....	80
Tabela 21: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (CaCl ₂).....	80
Tabela 22: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (CaCl ₂).....	81
Tabela 23: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (CaCl ₂).....	81
Tabela 24: Análise Descritiva para o P-Total (FeCl ₃).....	90
Tabela 25: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (FeCl ₃).....	90
Tabela 26: Análise Descritiva para os Polifosfatos (FeCl ₃).....	91
Tabela 27: Análise Descritiva para o P-Orgânico (FeCl ₃).....	91
Tabela 28: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (FeCl ₃).....	91
Tabela 29: Análise Descritiva para o P-Total (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	92
Tabela 30: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	92
Tabela 31: Análise Descritiva para os Polifosfatos (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	93
Tabela 32: Análise Descritiva para o P-Orgânico (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	93
Tabela 33: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (Al ₂ (SO ₄) ₃).....	93
Tabela 34: Análise Descritiva para o P-Total (CaO).....	94
Tabela 35: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (CaO).....	94
Tabela 36: Análise Descritiva para os Polifosfatos (CaO).....	95
Tabela 37: Análise Descritiva para o P-Orgânico (CaO).....	95
Tabela 38: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (CaO).....	95
Tabela 39: Análise Descritiva para o P-Total (CaCl ₂).....	96
Tabela 40: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (CaCl ₂).....	96
Tabela 41: Análise Descritiva para os Polifosfatos (CaCl ₂).....	97
Tabela 42: Análise Descritiva para o P-Orgânico (CaCl ₂).....	97
Tabela 43: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (CaCl ₂).....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONSEMA: Conselho Estadual do Meio Ambiente

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

E (%): Eficiência em porcentagem

ETE: Estação de Tratamento de Efluente

LO: Licença de Operação

pH: Potencial Hidrogeniônico

P-Total: Fósforo Total

P-Total Solúvel: Fósforo Total Solúvel ou Fósforo Total Dissolvido

P-Total Suspenso: Fósforo Total Particulado ou Fósforo Total Suspenso

P-Orgânico: Fósforo Orgânico

P-Orgânico Solúvel: Fósforo Orgânico Solúvel

P-Orgânico Suspenso: Fósforo Orgânico Suspenso ou Fósforo Orgânico Particulado

rpm: Rotações por minuto

SST: Sólidos Suspensos Totais

UASB: Reator anaeróbio de fluxo ascendente

UPF: Universidade de Passo Fundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Esgoto Sanitário.....	15
2.2 Tratamento anaeróbio e aeróbio para esgoto sanitário.....	17
2.3 Processos de coagulação, floculação e sedimentação.....	17
2.4 Necessidade de remoção de nutrientes.....	18
2.5 Legislação Ambiental.....	20
2.6 Fósforo.....	21
2.7 Formas do fósforo em esgotos sanitários.....	24
2.8 Remoção de Fósforo por Precipitação Química.....	25
2.9 Equilíbrio Químico.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Local da Pesquisa.....	30
3.2. Coleta do efluente.....	33
3.3 Local das análises.....	33
3.4 Parâmetros para a caracterização.....	33
3.5. Tratamento físico-químico aplicado ao efluente.....	34
3.6 Determinações Analíticas.....	35
3.7 Eficiência.....	37
3.8 Análise Estatística.....	37

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Caracterização do Efluente	38
4.2 Tratamento Físico-químico	43
4.2.1 Cloreto Férrico.....	43
4.2.2 Sulfato de Alumínio	47
4.2.3 Óxido de Cálcio.....	51
4.2.4 Cloreto de Cálcio	54
4.3 Eficiência do Tratamento Físico-Químico.....	58
4.3.1 Eficiência de remoção para o Cloreto Férrico	58
4.3.1.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Cloreto Férrico	61
4.3.2 Eficiência de remoção para o Sulfato de Alumínio	64
4.3.2.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Sulfato de Alumínio	67
4.3.3 Eficiência de remoção para o Óxido de Cálcio.....	70
4.3.3.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Óxido de Cálcio.....	73
4.3.4 Eficiência de remoção para o Cloreto de Cálcio	76
4.3.4.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Cloreto de Cálcio	79
5 CONCLUSÃO.....	83
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A	90
APÊNDICE B.....	92
APÊNDICE C.....	94
APÊNDICE D	96

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve no Brasil uma maior preocupação com sistemas de tratamento de efluentes, devido ao desenvolvimento do país, surgiu a necessidade de adaptações aos sistemas atuais de tratamento. As indústrias devem buscar tecnologias disponíveis, como as existentes em países desenvolvidos da Europa e Estados Unidos da América, pois estes já tinham como objetivo remoções de compostos biodegradáveis e sólidos totais entre as décadas de 40 e 60. Na década seguinte, anos 70, esses países já aperfeiçoavam seus sistemas, com objetivo de remover macronutrientes, em especial compostos que contivessem em sua estrutura os elementos nitrogênio e fósforo.

As estações de tratamento de efluentes, que tem em seu sistema estruturas básicas para a remoção de compostos biodegradáveis e sólidos em suspensão, não conseguem por sua vez uma eficiência satisfatória para remover fósforo, tornando-se necessário adaptações em seus sistemas a realidade para remoções deste poluente. Em alguns casos, surge a necessidade de um pós-tratamento com o objetivo de remover nutrientes pertinentes ao processo, em especial nitrogênio e fósforo, pois alguns sistemas não são eficientes para a remoção dos mesmos.

O tratamento de esgoto sanitário é geralmente composto por processos biológicos, podendo ser anaeróbios e aeróbios, ou mesmo a combinação entre ambos. Em função de padrões mais restritivos de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes em corpos receptores, a adoção de processos físico-químicos a jusante, combinados a processos biológicos existentes vem sendo utilizada. A aceitação de sistemas físico-químicos acoplados a sistemas de tratamento de esgoto sanitário se deve a sua eficiência na remoção do fósforo, pois o tratamento que ocorre por via biológica remove apenas parcialmente a carga poluidora de fósforo presente. Outra vantagem, em relação aos processos biológicos, é a flexibilidade do tratamento físico-químico, podendo ser facilmente adaptados a unidades já existentes.

A remoção de macronutrientes é uma forma de preservar os recursos hídricos, não está somente associada à consciência e o dever de respeitar os limites no descarte de efluentes nos

corpos receptores, mas para que possa haver qualidade nos corpos hídricos receptores e os mesmos possam propiciar o desenvolvimento da vida aquática de forma natural, sem o fenômeno da eutrofização.

A eutrofização é apontada como uma condutora de problemas de qualidade da água nos corpos hídricos, em especial pelo grau de nutrientes presentes. Em resposta ao enriquecimento desses nutrientes, há um aumento na produtividade da comunidade fitoplanctônica, que passa a apresentar um crescente aumento na dominância, principalmente por espécies conhecidas como cianobactérias encontradas na superfície dos corpos d' água. As florações de cianobactérias causam um amplo impacto social, econômico e ambiental, não apenas por sua biomassa contribuir para problemas estéticos como as formas verdes observadas na superfície dos corpos hídricos e o odor desagradável, mas, também por alterar o sabor da água tratada com finalidade de abastecimento. A decomposição das florações de algas altera a composição química da água e afeta a capacidade de sobrevivência de muitos animais aquáticos. A produção de metabólitos secundários bioativos pelas algas, a exemplo dos pirogênios com altas propriedades tóxicas, pode afetar diretamente a saúde do homem comprometendo o uso nobre da água para o abastecimento público (CARNEIRO; LEITE, 2008).

A necessidade de pós-tratamentos de efluentes, que promova a real remoção de nutrientes, tem o objetivo de evitar ou amenizar o processo de eutrofização, pelo acúmulo de nitrogênio e fósforo na forma de macronutrientes, além é claro, de atender aos parâmetros exigidos pelo órgão ambiental vigente.

Nesse contexto, tem-se como um dos objetivos deste trabalho a avaliação da eficiência de remoção das diferentes formas de fósforo existentes no esgoto sanitário, utilizando-se de diferentes coagulantes na forma de sais inorgânicos (cloreto férrico, sulfato de alumínio, óxido de cálcio e cloreto de cálcio) em diferentes concentrações.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Esgoto Sanitário

Segundo a definição da norma brasileira NBR 9648 (ABNT 1986), o esgoto sanitário é descrito com um despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial. Estima-se que deva conter de 6 mg/L a 20 mg/L de fósforo. O esgoto doméstico é gerado da água de abastecimento e sua medida resulta da água per capita consumida, que é usualmente estimada em 200 L/(hab.d), podendo variar conforme a localidade de origem (NUVOLARI et al., 2003). O Quadro 1 apresenta brevemente a composição provável do esgoto sanitário.

Tipo de substâncias	Origem	Observações
Sabões	Lavagem de louças e roupas	-
Detergentes (biodegradáveis ou não)	Lavagem de louças e roupas	A grande maioria contém fósforo na forma de polifosfato
Cloreto de sódio	Cozinha e urina humana	É eliminado em média de 7 g a 15 g por dia para cada ser humano
Fosfatos	Detergentes e urina humana	É eliminado em média 1,5 g por dia para cada ser humano
Sulfatos	Urina humana	-
Carbonatos	Urina humana	-
Uréia, amoníaco e ácido úrico	Urina humana	É eliminado de 14 g/d a 42 g/d de uréia para cada ser humano.
Gorduras	Cozinha e fezes humanas	-

(Quadro 1: Composição do esgoto doméstico continua página 16)

(Continuação Quadro 1: Composição do esgoto doméstico)

Substâncias córneas, ligamentos da carne e fibras vegetais não digeridas	Fezes humanas	Matéria orgânica em decomposição encontrada no esgoto
Amido (glicogênio, glicose), protéicos (proteínas, aminoácidos, albumina)	Fezes humanas	Matéria orgânica em decomposição encontrada no esgoto
Urobilina, pigmentos hepáticos, etc.	Urina humana	Matéria orgânica em decomposição encontrada no esgoto
Mucos, células de descamação epitelial	Fezes humanas	Matéria orgânica em decomposição encontrada no esgoto
Vermes, bactérias, vírus, leveduras, etc.	Fezes humanas	Matéria orgânica em decomposição encontrada no esgoto
Outros: areia, plásticos, cabelos, sementes, fetos, madeira, absorventes, etc.	Areia: provida de infiltrações em redes coletoras e outros; Outras substâncias lançadas por usuários no próprio vaso sanitário	-
Água	Urina humana, Fezes humanas, Uso doméstico	Maior constituinte: 99,87%

Quadro 1: Composição do esgoto doméstico.

Fonte: Adaptado de NUVOLARI et al., 2003.

Estudos descritivos e classificatórios de partículas presentes no esgoto, como o de Rudolfs e Balmat (1952) apud Santos (2006), descrevem que as partículas podem ocorrer em uma grande faixa de tamanho, que pode variar desde menos de 0,001 μm a mais de 100 μm .

O tamanho e a distribuição de tamanho das partículas interferem na remoção destas e prejudicam o desempenho da grande maioria dos processos e operações utilizadas no tratamento de esgoto (SANTOS et al., 2004). Esse fator interfere no tratamento aplicado ao efluente e muitas vezes é necessário um pós-tratamento para a remoção dessas partículas pertinentes ao processo.

2.2 Tratamento anaeróbio e aeróbio para esgoto sanitário

O processo de tratamento anaeróbio mostrou-se, com o passar dos anos e após diversas pesquisas, um bom tratamento para águas residuais, porém este demonstra uma deficiência parcial devido a resíduos orgânicos presentes após essa etapa de tratamento (BODIK et al., 2003).

Segundo Banu et al. (2007), o tratamento anaeróbio aplicado ao efluente sanitário é responsável pela redução de boa parte da matéria orgânica presente, porém não é eficaz quanto à redução de macronutrientes, em especial nitrogênio e fósforo. Estes ao entrarem em contato com corpos receptores, seu excesso causará a proliferação em massa de algas e outras plantas aquáticas que acabam por desestabilizar o ciclo biológico natural daquele ambiente. Torna-se então necessário outros tratamentos complementares, que possibilitem a remoção total ou parcial dos níveis de nutrientes presentes no efluente.

Gaspariková et al. (2005), comentam que tecnologias como a de sistemas acoplados de tratamento anaeróbio seguido de tratamento aeróbio, são usualmente utilizados com objetivo de remoção de carga orgânica poluidora em águas residuárias. Segundo o autor, esse processo além de remover a carga orgânica e os sólidos em suspensão, também é responsável pela remoção de parte dos macronutrientes presentes.

O fósforo é parte integrante do protoplasma das células existentes em vários microrganismos, pode-se dizer que ele seja um constituinte essencial da síntese bacteriana. O ideal para sistemas de tratamento de efluentes que utilizam processo biológico seria de manter a relação carbono, nitrogênio e fósforo próximas de 100:5:1 (NUVOLARI et al., 2003).

2.3 Processos de coagulação, floculação e sedimentação

O processo de coagulação, no tratamento de efluentes, tem por objetivo a desestabilização das cargas negativas dos colóides e sólidos em suspensão. A etapa ocorre por agitação rápida, onde o agente coagulante ao entrar em contato com o efluente hidrolisa e polimeriza, reagindo com a alcalinidade natural da água, formando hidróxidos, que por sua

vez produzem íons positivos em solução. Os íons positivos presentes, são responsáveis pela desestabilização das cargas negativas dos colóides, o que reduz o potencial zeta a pontos próximos a zero, também chamado de ponto isoelétrico (NUNES, 2004).

O processo de floculação por sua vez, ocorre em sequência ao processo de coagulação, porém em etapa lenta, com gradiente de velocidade situada entre 20 s e 80 s. A etapa lenta tem por objetivo dar tempo para que os coágulos formados na etapa anterior, possam colidir mutuamente para posterior união formando flocos maiores. É de suma importância a empregabilidade adequada na dosagem dos agentes coagulantes, respeitando em especial o fator de pH, para a formação de flocos grandes e com densidade suficiente para a sedimentação (IBID, 2004).

A sedimentação é um fenômeno físico que ocorre por ação gravitacional. As partículas suspensas em solução aquosa, apresentam movimento descendente no meio onde há menor massa específica. Esse fenômeno propicia a separação das fases líquida e sólida, baseado na teoria de que qualquer partícula não coloidal, suspensa em meio líquido de menor massa específica e em repouso, será acelerada pela ação da gravidade (Di BERNARDO; DANTAS, 2005 apud FARIA, 2006).

2.4 Necessidade de remoção de nutrientes

A eutrofização de rios, lagos, e outros, resultante do aumento de macronutrientes, em especial pela presença do nitrogênio e do fósforo, deixou de ser um fenômeno desencadeado somente de maneira natural, pelo arraste de nutrientes trazidos pelas chuvas e águas superficiais; agora também é causado pelo homem, de maneira artificial, por suas atividades antropogênicas, as quais reproduzem o processo natural, surgindo assim a eutrofização artificial (BRANDÃO et al., 2006).

Nas últimas décadas, a eutrofização decorrente do lançamento nos corpos d'água de efluentes domésticos e industriais vem se agravando. A industrialização e inúmeras outras atividades rotineiras do homem moderno estão gerando cada vez mais agentes eutrofizantes, como fosfatos, amônias e nitratos. Substâncias essas que estão diretamente relacionadas com o processo fotossintético das algas e das plantas aquáticas, uma vez que pertencem à estrutura de muitos compostos importantes no metabolismo da célula vegetal, como exemplo trifosfato e proteínas (IBID, 2006).

Os efeitos dessa eutrofização artificial manifestam-se com a quebra do equilíbrio ecológico, pois a produção de matéria orgânica é muito maior do que o sistema é capaz de decompor pela biodegradabilidade natural. Esses efeitos indesejáveis e decorrentes da ação do homem alteram as condições físico-químicas do meio, que vão desde o aumento da concentração de nutrientes até alterações significativas no pH em curto período de tempo (HOSNI et al., 2008). O fator biológico também é afetado, causando alterações na diversidade dos organismos aquáticos. Dessa forma, muitos organismos vivos acabam morrendo, em especial os peixes e também outros organismos dependentes do oxigênio dissolvido, além é claro de outros problemas estéticos e recreacionais, como florações das águas, maus odores. Torna-se então necessária a remoção dos nutrientes causadores deste problema (HOSNI et al., 2008; VON SPERLING, 2005).

Segundo Jordão e Pessoa (2005), os principais nutrientes que precisam ser controlados em relação ao lançamento dos esgotos tratados são o fósforo e o nitrogênio.

Entre as diferentes formas de fósforo presentes nos efluentes, as denominadas ortofosfatos, representados pelos radicais PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , são as frações que estão diretamente biodisponíveis aos sistemas biológicos comumente associados à eutrofização. Entretanto, outras formas não biodisponíveis aos sistemas biológicos, como polifosfatos e fósforo orgânico, apesar de estarem ligados a partículas coloidais orgânicas e inorgânicas, também poderão tornar-se fontes potencialmente disponíveis (MAHER; WOO; 1998 apud SOUZA, 2007).

O uso de detergentes a base de polifosfatos influencia significativamente os teores de fósforo em águas residuárias, estes podem contribuir com índices de até 50% da contribuição total de fósforo nos esgotos sanitários (VON SPERLING, 2005).

Os polifosfatos podem lentamente transformar-se em ortofosfatos pelo processo de hidrólise, enquanto que o fósforo orgânico é convertido a ortofosfato pelo processo de mineralização biológica (HAYGARTH; JARVIS, 1999; McDOWELL et al., 2001; McDOWELL et al., 2004; apud COSTA, 2008).

2.5 Legislação Ambiental

De forma a proteger os corpos d'água receptores de efluentes, tornou-se necessário o desenvolvimento de sistemas de tratamento terciário de esgoto, sistemas que além da remoção dos sólidos sedimentáveis e do material orgânico pertinente ao processo de tratamento usual, possam remover os nutrientes como o fósforo, antes do seu descarte final em corpos hídricos receptores (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999 apud COSTA, 2005).

Os padrões de lançamento de efluentes líquidos para o Estado Rio Grande do Sul, são regidos pela Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) n° 128/2006, nos dos parâmetros de controle descritos nas Tabelas 1 e 2, para efluentes domésticos, como a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5), Demanda Química de Oxigênio (DQO) Sólidos Suspensos (SS) e para o Fósforo (P), estabelece ainda limites de pH para descarte que pode variar de 6,0 a 9,0, e temperatura que deve ser inferior a 40°C. A Tabela 2 traz os limites estabelecidos para a concentração de fósforo e/ou a eficiência do processo conforme a faixa de vazão para descarte do efluente sanitário (CONSEMA, 2006).

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357/2005 rege as condições e padrões de lançamento de efluentes. De acordo com esta resolução, o pH do efluente deve estar entre 5,0 e 9,0, a temperatura deve ser inferior a 40°C, e a concentração de sólidos sedimentáveis deve ser de até 1 mL.L⁻¹(CONAMA, 2005).

Tabela 1: Limites estabelecidos para Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio e Sólidos Suspensos, de acordo com a vazão do efluente.

Faixa de vazão (m ³ /d)	DBO_5 (mg /L O ₂)	DQO (mg /L O ₂)	SS (mg/L)
Q < 20	180	400	180
20 ≤ Q < 100	150	360	160
100 ≤ Q < 200	120	330	140
200 ≤ Q < 500	100	300	100
500 ≤ Q < 1000	80	260	80
1000 ≤ Q < 2000	70	200	70
2000 ≤ Q < 10000	60	180	60
1000 ≤ Q	40	150	50

Fonte: Adaptado de CONSEMA, (2006).

Tabela 2: Limites estabelecidos para Fósforo de acordo com a vazão do efluente.

Faixa de vazão (m ³ /d)	Fósforo	
	Concentração (mg P/L)	Eficiência (%)
Q < 200	-	-
200 ≤ Q < 500	-	-
500 ≤ Q < 1 000	-	-
1 000 ≤ Q < 2 000	3	75
2 000 ≤ Q < 10 000	2	75
10 000 ≤ Q	1	75

Fonte: Adaptado de CONSEMA, (2006).

2.6 Fósforo

O elemento químico fósforo é essencial ao crescimento de microrganismos e à vida aquática pela necessidade destes em seu metabolismo celular. Na forma de fosfatos dissolvidos, torna-se um importante nutriente para os produtores primários. O lançamento de despejos ricos em fosfatos em ambientes aquáticos que já contenham compostos nitrogenados, faz com que ocorra uma proliferação do desenvolvimento de microrganismos e também de macrorganismos fotossintetizadores (BAUMGARTEN; POZZA, 2001).

O fósforo, principalmente na forma de ânion fosfato, presente em efluentes sanitários e industriais, é a principal causa da eutrofização em ambientes aquáticos (ZHOU et al., 2008).

A Figura 1 apresenta o ciclo do fósforo, enquanto que a Figura 2 mostra algumas formas do fósforo na forma de ânion.

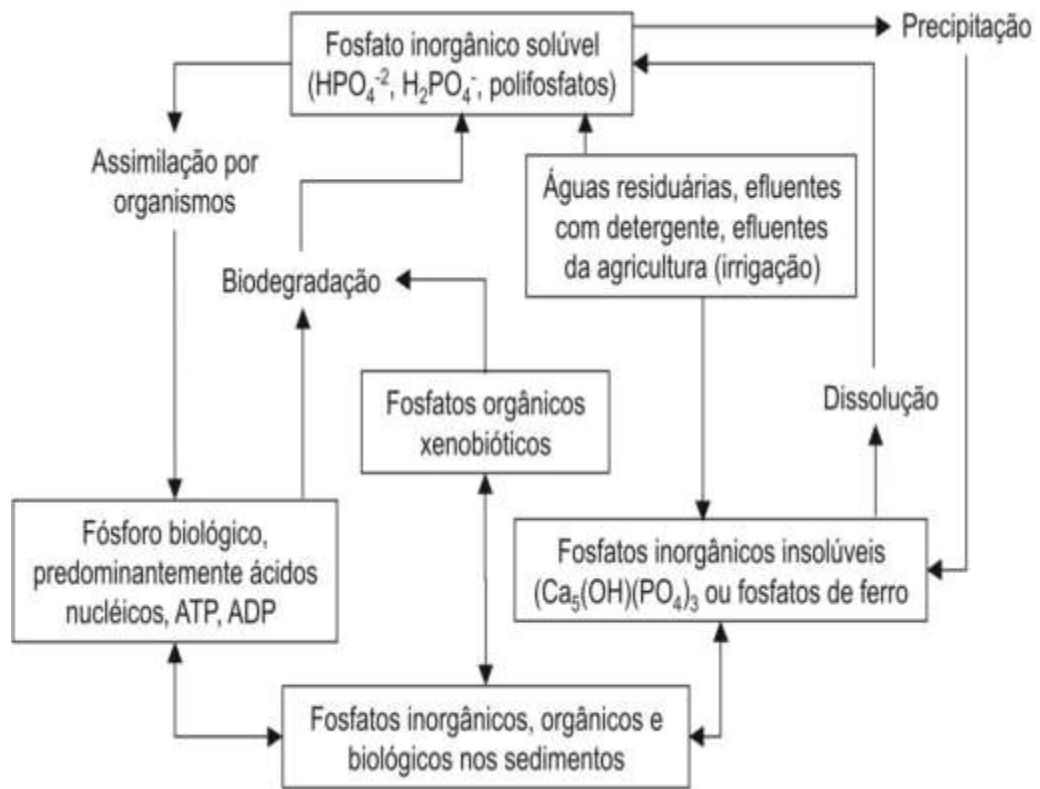


Figura 1: O Ciclo do fósforo. (MANAHAN, 1994 apud LIMA, 2003)

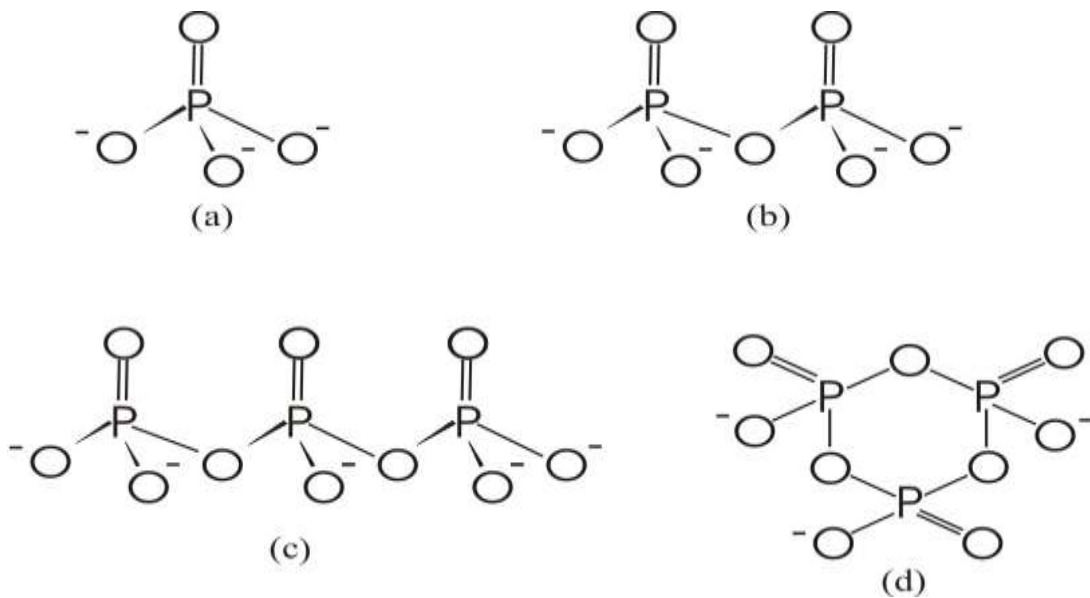


Figura 2: Ânions do fósforo (a) ortofosfato, (b) pirofosfato ou dipolifosfato, (c) tripolifosfato, (d) trimetafosfato .

Fonte: (OSÓRIO; OLIVEIRA, 2001 apud FARIA, 2006).

As principais formas de fósforo encontradas em ambientes aquáticos são: fosfato particulado, fosfato orgânico dissolvido, fosfato inorgânico dissolvido ou ortofosfato, fosfato total dissolvido e fosfato total. Em meio aquoso, o íon fosfato, pode estar sob diferentes formas conforme o pH desse sistema. A Tabela 3 apresenta as várias espécies relacionadas ao pH do meio (ESTEVEES, 1998 apud FARIA, 2006).

Tabela 3: Espécies iônicas de fosfato presentes em solução em diferentes valores de pH

pH	% de cada espécie iônica presente			
	H ₃ PO ₄	H ₂ PO ₄ ⁻	HPO ₄ ⁻²	PO ₄ ⁻³
4	0,9	99,0	0,2	7 x 10 ⁻¹⁰
5	0,1	98,0	2,0	7 x 10 ⁻⁸
6	8 x 10 ⁻³	82,0	18,0	6 x 10 ⁻⁶
7	3 x 10 ⁻⁴	33,0	67,0	2 x 10 ⁻⁴
8	4 x 10 ⁻⁶	3,0	97,0	2 x 10 ⁻³
9	5 x 10 ⁻⁸	0,5	99,5	4 x 10 ⁻²

Fonte: (ESTEVEES, 1998 apud FARIA, 2006).

O excesso de fósforo vem sendo o responsável por danos ambientais. Esse fato demanda medidas para prevenir ou diminuir a introdução desse nutriente no meio-ambiente. Esta é a justificativa para o desenvolvimento de novas tecnologias para a remoção deste no descarte dos efluentes (BLACKALL et al., 2002).

Segundo Okunuki et al. (2004), o fósforo originado de efluentes domésticos, tem causado frequentemente a eutrofização de corpos receptores deste tipo de efluente, em especial em áreas aquáticas fechadas como lagos.

O fósforo pode ser encontrado em minerais na geosfera, em especial em minerais pouco solúveis, como a hidroxiapatita (Ca₅(OH)(PO₄)₃) (MANAHAN, 1994 apud LIMA, 2003). Por ser um recurso não-renovável, está diminuindo ano a ano e estima-se que este elemento economicamente explorável, terá suas reservas esgotadas entre sessenta e cento e trinta anos (STEEN, 1998 apud ZHOU et al., 2008). Portanto, há um impulso considerável para desenvolver novas tecnologias eficazes para remover e recuperar o fósforo de esgotos sanitários e industriais (ZHOU et al., 2008).

Algumas terminologia e formas do fósforo são apresentadas no Quadro 2.

Formas de P	Classificação		Características
Inorgânicos	Fosfatos	Ortofosfatos PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4^- , H_3PO_4	Facilmente extraível e prontamente disponível para o metabolismo biológico sem necessidade de conversões às formas mais simples
	Polifosfatos	Pirofosfatos e Metafosfatos	Moléculas mais complexas. Transformam-se lentamente em ortofosfatos pelo processo de hidrólise
Orgânicos	Ortofosfatos monoesteres	Ácido fítico Lipídio	Ao longo do tempo são convertidos em ortofosfatos pelo processo de mineralização
	Ortofosfatos diesteres	DNA, RNA, glucose fosfatos e ATP	
Dissolvido	Inorgânico/Orgânico		Material que passa através de um filtro de membrana de 0,45 μm
Particulado	Inorgânico/Orgânico		Material que fica retido no filtro de membrana de 0,45 μm
Reativo	Inorgânico		Respondem aos testes colorimétricos sem necessidade de prévia digestão oxidativa
Não Reativo	Orgânico		Frações convertidas a ortofosfatos através da destruição da matéria orgânica pela digestão oxidativa
Lábil	Inorgânico/Orgânico		Fósforo adsorvido e que pode ser liberado tornando-se disponível
Não Lábil	Inorgânico/Orgânico		Fósforo adsorvido e que não pode ser liberado tornando-se indisponível

Quadro 2 - Formas e terminologia do fósforo.

Fonte:(HAYGARTH; JARVIS, 1999; McDOWELL et al., 2004; apud COSTA, 2008).

2.7 Formas do fósforo em esgotos sanitários

O fósforo presente nos esgotos é composto de fósforo orgânico e fosfatos, sendo os fosfatos presentes em maior quantidade. Entre as formas de fosfatos estão incluídas os polifosfatos e os ortofosfatos. As três principais formas moleculares em que o elemento fósforo se apresenta em esgotos sanitários são: fosfatos orgânicos, onde o fósforo está presente na composição de moléculas orgânicas; ortofosfatos (fosfatos inorgânicos)

apresentados na forma de radicais PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} e H_2PO_4^- , H_3PO_4 , os quais quando combinados a cátions formam os sais inorgânicos em solução aquosa; e os chamados polifosfatos (fosfatos inorgânicos) ou fosfatos condensados, uma forma de polimerização dos ortofosfatos. Alguns microorganismos podem armazenar excesso de fósforo na forma de polifosfatos. (GUALBERTO, 2009; NUVOLARI et al., 2003).

A especiação química típica do fósforo em esgotos sanitários brutos indica que 90% do fósforo encontra-se na forma de fósforo solúvel, enquanto que apenas o restante deva estar na forma de fósforo insolúvel. O fósforo orgânico insolúvel presente não ultrapassa os 10% da concentração total do fósforo na sua forma insolúvel, o que faz com que a maior parte dele esteja de fato presente nos esgotos sanitários na forma de fósforo inorgânico. A remoção do material particulado e coloidal presente nos esgotos sanitários, através de simples separação física de sólido/líquido por gravidade, conduz a uma eficiência reduzida a eliminação do fósforo, justificando-se, portanto a adoção de processos biológicos ou físico-químicos para uma melhor desempenho de remoção deste macronutriente (GUALBERTO, 2009; NUVOLARI et al., 2003).

Segundo König et al., (1991), uma das principais causas do aumento significativo da quantidade de fósforo total nos efluentes sanitários, são em especial o uso de detergentes sintéticos contendo polifosfatos.

2.8 Remoção de Fósforo por Precipitação Química

O uso de processos de precipitação química em combinação com processos biológicos de tratamento oferece flexibilidade com respeito à remoção de fósforo, uma vez que é possível controlar a eficiência do processo de remoção de fósforo, independentemente das condições de operação dos processos biológicos de tratamento (FILHO et al., 2009).

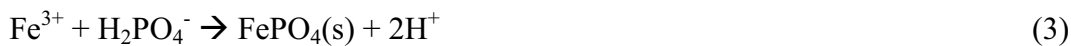
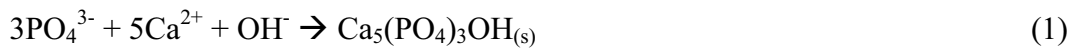
O processo físico-químico implantado a jusante de processos biológicos de tratamento, garante não somente a remoção de fósforo, mas também efetua um polimento no efluente tratado, influenciando também a remoção da carga orgânica poluidora pertinente ao processo biológico, acarretando no aumentando significativo da qualidade deste, no descarte do corpo hídrico receptor (IBID, 2009).

Segundo Alem Sobrinho e Jordão (2003), para obter uma remoção elevada do nível de fósforo no efluente, não se recomenda o uso de sistemas anaeróbios a montante de um sistema

biológico pré-existente, o ideal é a adição de produtos químicos em tratamento complementar, ou alternativas como a flotação por ar dissolvido, coagulação-floculação, decantação e filtração.

Existem fatores físicos, químicos e físico-químicos que podem interferir na precipitação dos íons fosfato no ambiente aquático, como a concentração de íons de ferro, alumínio, sulfeto, compostos orgânicos e carbonatos, pH e condições de oxi-redução (ESTEVEZ 1998, apud FARIA 2006).

A precipitação química de fósforo pode ser feita através da adição de cátions como Ca^{+2} , Fe^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} . A estequiometria das reações para a remoção química de fósforo com fontes de Ca, Fe e Al são apresentadas nas equações 1, 2 e 3. Para um dado metal, a formação destes precipitados, é dependente da constante de equilíbrio que controla sua solubilidade e pelo pH inicial, alcalinidade, e concentração de ortofosfato solúvel no efluente (SANTOS, 2003).



O fósforo presente no efluente pode ser eliminado por processos biológicos e físico-químicos. Entre os processos físico-químicos, a precipitação química vem sendo a mais utilizada. Sabe-se através de experimentos que o uso do cloreto férrico (FeCl_3), em dosagens ótimas, pode promover uma eficiência de até 90% por precipitação. Enquanto que com a combinação do cloreto férrico e o óxido de cálcio (CaO), também conhecido popularmente como cal, pode-se então atingir uma remoção de até 95%. A equação 4 expressa a reação de precipitação que ocorre entre o CaO e o fósforo presente no efluente (NUNES, 2004).



Silva e Lauria (2006), relatam que a substituição do sulfato de alumínio pelo cloreto férrico ou pelo sulfato férrico é tecnicamente viável, apesar de haver a ressalva de que o

cloreto férrico não é economicamente viável, quando comparado ao sulfato férrico em função de seu custo ser mais elevado.

Zhou et al. (2008) estudaram a remoção de fósforo por processo físico-químico em águas residuais, com o uso de cloreto férrico como coagulante e ácido tânico, um polímero natural como auxiliar de coagulação. Obtendo resultados promissores, Zhou et al. (2008) desenvolveram esse processo de coagulação eficaz com a ênfase na remoção de fósforo. Os resultados mostraram que a adição de um auxiliar de coagulação pode acelerar a velocidade de sedimentação, formando flocos com tamanho maiores, além de amenizar ou eliminar a cor amarela causada pelo Fe (III) e aumentar ligeiramente a eficiência de remoção.

Segundo Metcalf e Eddy (2005), pode-se obter remoções utilizando-se de sais de ferro ou alumínio adicionados em vários pontos de uma estação de tratamento de efluentes, mas devido aos polifosfatos e ao fósforo orgânico serem removidos por precipitação com maior dificuldade do que os ortofosfatos, adicioná-los após o tratamento secundário, onde o fósforo orgânico e os polifosfatos são transformados em ortofosfatos, usualmente resulta em melhor eficiência de remoção. Além dessa condição, ainda podem ocorrer remoções adicionais de nitrogênio por causa da melhor sedimentabilidade dos sólidos.

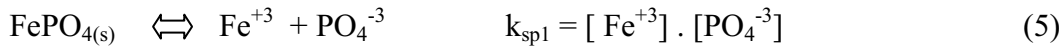
Durante o tratamento biológico, anaeróbio seguido de aeróbio, aplicado ao efluente sanitário, existe a tendência natural ao fracionamento das moléculas orgânicas presentes de alto peso molecular. Este fracionamento, faz com que os polifosfatos sejam hidrolisados a ortofosfatos, acarretando uma importância significativa na remoção destes quando se utiliza de processos físico-químicos (MARGUTI et al., 2008).

Segundo Faria (2006), a eficiência da remoção do fósforo por precipitação química depende primordialmente de dois fatores, o equilíbrio químico entre as fases sólida e líquida do fósforo e a eficiência do processo na remoção de sólidos.

2.9 Equilíbrio Químico

Segundo Marguti et al. (2008), o ferro quando adicionado em meio aquoso participa da reação de hidrólise, formando espécies polinucleares e mononucleares solúveis. O íon ferro III (Fe^{3+}), ao precipitar, formando o fosfato férrico e o hidróxido de ferro, torna-se insolúvel. A concentração de Fe^{3+} solúvel presente em meio aquoso depende da constante de equilíbrio

expressa nas equações 5 e 6. Jensen (2003) apud Marguti et al.(2008) trazem valores de k_{sp1} e k_{sp2} para a constante de equilíbrio que equivalem respectivamente a $10^{-26,4}$ e $10^{-37,11}$.



Pode-se estimar a máxima concentração solúvel do ferro em sua fase líquida, utilizando-se do somatório de suas espécies quando hidrolisadas, conforme forma ilustrativa demonstrada na equação 7. A equação 8, demonstra o cálculo para as concentrações molares do ferro na forma de Fe^{+3} (IBID, 2008).

$$\text{Fe}_{(s)} = [\text{Fe}^{+3}] + [\text{FeOH}^{+2}] + [\text{Fe(OH)}_2^+] + [\text{Fe(OH)}_3^0] + [\text{Fe(OH)}_4^-] \quad (7)$$

$$\text{Fe}_{(s)} = [\text{Fe}^{+3}] \cdot (1 + K_1 \cdot [\text{OH}^-] + K_2 \cdot [\text{OH}^-]^2 + K_3 \cdot [\text{OH}^-]^3 + K_4 \cdot [\text{OH}^-]^4) \quad (8)$$

Em casos onde a solubilidade do ferro for controlada pelo fosfato férrico, Marguti et al. (2008), diz que as concentrações de Fe^{+3} podem ser calculadas de acordo com a equação 9, porém se o controle se der pelo hidróxido férrico, as concentrações de Fe^{+3} devem ser calculadas de acordo com a equação 10.

$$\text{Fe}_s = \frac{K_{sp1}}{[\text{PO}_4^{-3}]} (1 + K_1 [\text{OH}^-] + K_2 [\text{OH}^-]^2 + K_3 [\text{OH}^-]^3 + K_4 [\text{OH}^-]^4) \quad (9)$$

$$\text{Fe}_s = \frac{K_{sp1}}{[\text{OH}^-]^3} (1 + K_1 [\text{OH}^-] + K_2 [\text{OH}^-]^2 + K_3 [\text{OH}^-]^3 + K_4 [\text{OH}^-]^4) \quad (10)$$

A solubilidade do ferro controlada pelo fosfato férrico e considerando o balanço de massa para ambos os elementos, ferro e fósforo em meio aquoso, o equilíbrio, pode ser representado pelas equações 11 e 12 (IBID, 2008).

$$\text{Fe}_T = \text{Fe}_s + \text{Fe}_p \quad (11)$$

$$P_T = P_s + P_p \quad (12)$$

As equações 11 e 12 representam:

Fe_T e P_T = concentração de ferro e fósforo total na fase líquida

Fe_s e P_s = concentração de ferro e fósforo solúvel na fase líquida

Fe_p e P_p = concentração de ferro e fósforo precipitado na fase líquida

Ibid (2008), comenta que as concentrações molares de ferro e fósforo precipitado são equivalentes, 1 mol de Fe (ferro) requerido para a precipitação de 1 mol de P (fósforo) conforme a equação 13.

$$P_p = Fe_p \quad (13)$$

Conhecendo as concentrações totais de ferro (Fe_T) e fósforo (P_T), na fase líquida, restam quatro incógnitas Fe_s , P_s , Fe_p e P_p e quatro equações 10, 11, 12 e 13, as quais permitem determinar diagramas de solubilidade do ferro e fósforo para diferentes condições de pH. (MARGUTI et al., 2008).

3 Materiais e Métodos

3.1 Local da Pesquisa

O efluente tratado por processo físico-químico foi proveniente da ETE da Universidade de Passo Fundo (Figura 3) localizada no campus I da Universidade, em Passo Fundo, com capacidade para uma população em uso de aproximadamente 18 000 pessoas. A ETE em estudo foi projetada para operar em fluxo contínuo de 24 horas, com vazão média de $9 \text{ m}^3/\text{h}$. O efluente passa pelo sistema de gradeamento para remoção de sólidos grosseiros, passando posteriormente por uma caixa de areia e seguindo para um tanque de equalização. No tanque de equalização o efluente é bombeado para o reator UASB, passando para um tanque de aeração e posteriormente para o decantador secundário. Após o decantador secundário o efluente é descartado para o corpo hídrico receptor. A planta baixa e as etapas da ETE estão descritas nas Figuras 4 e 5.



Figura 3: ETE da Universidade de Passo Fundo.

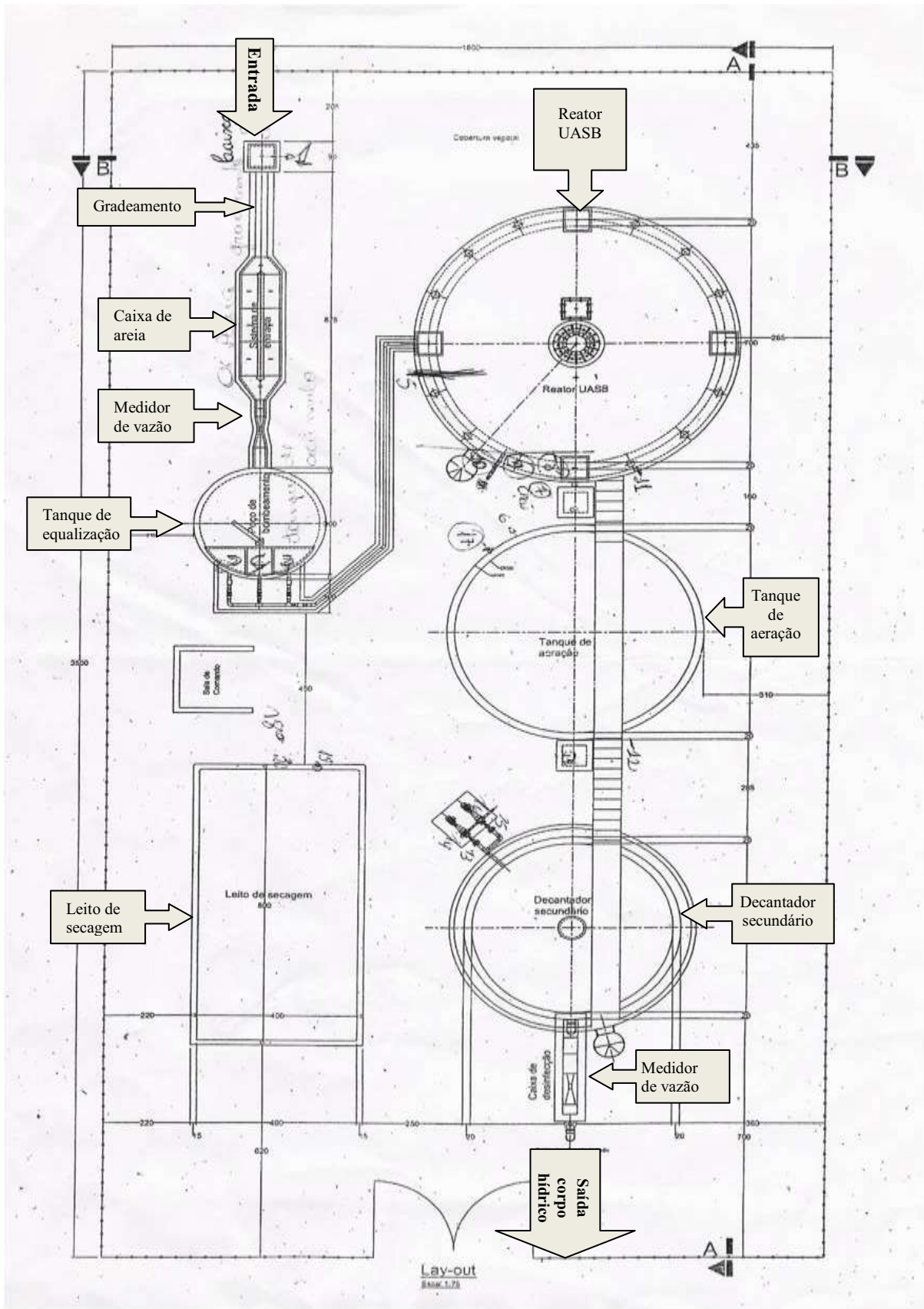


Figura 4: Planta baixa da ETE da Universidade de Passo Fundo.



(a) Vista frontal da ETE



(b) Sala de comando



(c) Entrada da ETE



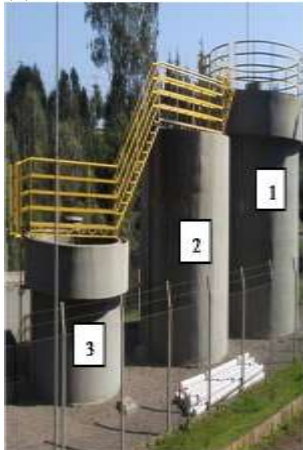
(d) Gradeamento



(e) Caixa de areia



(f) Tanque de equalização



(g) Vista lateral da ETE



(h) Leito de secagem



(i) Saída para o corpo hídrico

Figura 5: Etapas da ETE da Universidade de Passo Fundo.

Obs: 5(g) Vista lateral da ETE: 1-Reator UASB, 2-Tanque de aeração, 3-Decantador secundário

3.2. Coleta do efluente

A coleta do efluente da ETE foi realizada na saída para o corpo hídrico receptor, figura 5(i), após o decantador secundário, durante os meses de maio, junho e julho de 2010 para a fase de caracterização e no mês de agosto de 2010 para o tratamento físico-químico aplicado. A amostra foi composta, sendo efetuada uma coleta parcial da vazão horária a cada hora durante o período diurno, iniciando às 08:00 horas da manhã até às 18:00 horas.

3.3 Local das análises

As análises foram realizadas no Laboratório de Operações Unitárias do prédio L1 do Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade de Passo Fundo, Campus I.

3.4 Parâmetros para a caracterização

O efluente coletado na ETE foi caracterizado em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais, pH, e Fósforo em suas diferentes formas: Fósforo Total, Fósforo Total Dissolvido, Fósforo Total Particulado, Ortofosfato Reativo, Ortofosfato Reativo Solúvel, Ortofosfato Reativo Particulado, Polifostato, Polifostato Solúvel, Polifostato Particulado, Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Particulado.

A metodologia para determinação dos diferentes parâmetros de estudo está descrita no item 3.6.

As análises foram realizadas em triplicatas, conforme métodos analíticos descritos em APHA/AWW/WEF (2005).

3.5. Tratamento físico-químico aplicado ao efluente

O efluente foi submetido ao tratamento físico-químico de floculação e posterior sedimentação aplicado em batelada de 2 L, com o uso de equipamento Jar-Test (Figura 6), aplicando-se coagulantes específicos.

Os tempos utilizados para os coagulantes foram adotados a partir da otimização do coagulante cloreto férrico (FeCl_3) para a comparação das eficiências entre ambos.

O resumo esquemático do tratamento físico-químico aplicado é descrito na Tabela 4.

Os ensaios foram realizados em duplicatas.

Tabela 4: Resumo esquemático do tratamento físico-químico.

Reagentes	Concentrações (mg/L)				Tempos			pH	
					Etapa rápida	Etapa lenta			
FeCl_3	100	150	200	250	115 s	120 rpm	600 s	40 rpm	<i>In natura</i>
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	150	200	250	115 s	120 rpm	600 s	40 rpm	<i>In natura</i>
CaO	100	150	200	250	115 s	120 rpm	600 s	40 rpm	9
CaCl_2	100	150	200	250	115 s	120 rpm	600 s	40 rpm	10



Figura 6: Equipamento Jar-Test contendo efluente antes do tratamento físico-químico.

3.6 Determinações Analíticas

O Quadro 3 traz o resumo metodológico das análises realizadas e suas respectivas referências, enquanto que a Figura 7 mostra de forma resumida a obtenção das formas fracionadas do fósforo.

<i>Análises</i>	<i>Descrição metodológica</i>	<i>Método</i>	<i>Referência</i>
Fósforo Total	- Oxidação com persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$); - Colorimetria.	4500-P “B” 4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Fósforo Total Solúvel	- Filtração; - Oxidação com persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$); - Colorimetria.	4500-P “B” 4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Fósforo Total Suspenso ou Particulado	- Cálculo da diferença entre P-Total e P-Total Solúvel.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Ortofosfato	- Colorimetria.	4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Ortofosfato Solúvel	- Filtração; - Colorimetria.	4500-P “B” 4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Ortofosfato Suspenso ou Particulado	- Cálculo da diferença entre Ortofosfato e Ortofosfato Solúvel.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Polifosfato	- Hidrólise ácida; - Colorimetria.	4500-P “B” 4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Polifosfato Solúvel	- Filtração; - Hidrólise ácida; - Colorimetria	4500-P “B” 4500-P “E”	APHA/AWW/ WEF (2005)
Polifosfato Suspenso ou Particulado	- Cálculo da diferença entre Polifosfato e Polifosfato Solúvel.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
P-Orgânico	- Cálculo da diferença entre a soma dos Ortofosfatos e Polifosfatos pelo P-Total.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
P-Orgânico Solúvel	- Cálculo da diferença entre a soma dos Ortofosfatos Solúveis e Polifosfatos Solúveis pelo P-Total Solúvel.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
P-Orgânico Suspenso ou Particulado	- Cálculo da diferença entre P-Orgânico e P-Orgânico Solúvel.	4500-P “1”	APHA/AWW/ WEF (2005)
DQO	- Refluxo fechado; - Colorimetria.	5220 “D”	APHA/AWW/ WEF (2005)
DQO Solúvel	- Filtração; - Refluxo fechado; - Colorimetria.	5220 “D”	APHA/AWW/ WEF (2005)
SST	- Gravimetria.	2540 “B”	APHA/AWW/ WEF (2005)
pH	- Eletrometria.	-	ASTM NBR 7353:1989

Quadro 3: Resumo metodológico das análises.

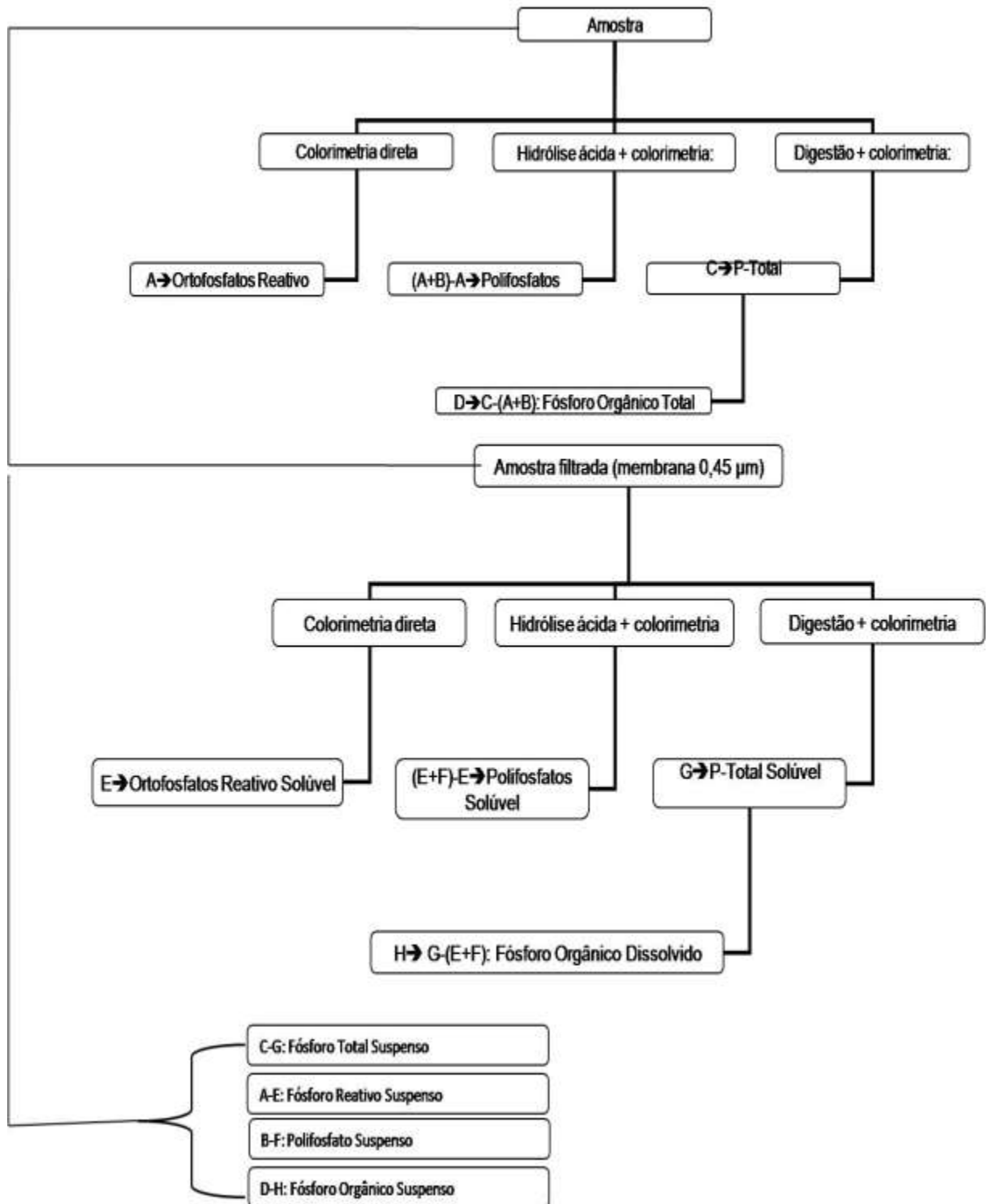


Figura 7: Resumo da obtenção das formas fracionadas do fósforo.
 Fonte: Adaptado Figura 4500-P:1 de APHA/AWW/WEF(2005).

3.7 Eficiência

Após o tratamento físico-químico realizou-se o cálculo da eficiência para a remoção de DQO, SST e fósforo em suas diferentes formas. Esta eficiência foi calculada para o efluente retirado do reator logo após o tratamento físico-químico.

As eficiências em termos de remoção de DQO, SST e fósforo em suas diferentes formas foram calculadas utilizando-se a equação 14.

$$E = \left(1 - \frac{C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad (14)$$

Sendo:

E = Eficiência de remoção (%)

C_f = Concentração final de DQO, SST e fósforo em suas diferentes formas após o tratamento físico-químico (mg.L^{-1})

C_i = Concentração inicial de DQO, SST e fósforo em suas diferentes formas antes do tratamento físico-químico (mg.L^{-1})

3.8 Análise Estatística

A partir do Programa Estatístico Costat, na função Estatística Descritiva, conforme orientações de Costa e Castoldi (2009), realizou-se de forma resumida as características gerais do conjunto de dados em relação à magnitude dos valores e na sua ótica de variabilidade. Os parâmetros analisados de média, desvio padrão, variância e o coeficiente de variação foram obtidos pelas médias resultantes da quantificação originadas dos coagulantes (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, CaO e CaCl_2) e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L).

O detalhamento para o Teste Tukey's foi realizado a partir do mesmo programa estatístico Costat, conforme orientações de Ibid (2009), na função Anova Teste Tukey's com intervalo de confiança de 95% ou seja $p < 0,05$. Para este utilizou-se as médias das eficiências calculadas do tratamento físico-químico individualmente para os diferentes coagulantes (FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, CaO e CaCl_2) e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L).

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização do Efluente

A Figura 8 traz a caracterização para o efluente em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, vazão e Sólidos Suspensos Totais (SST).

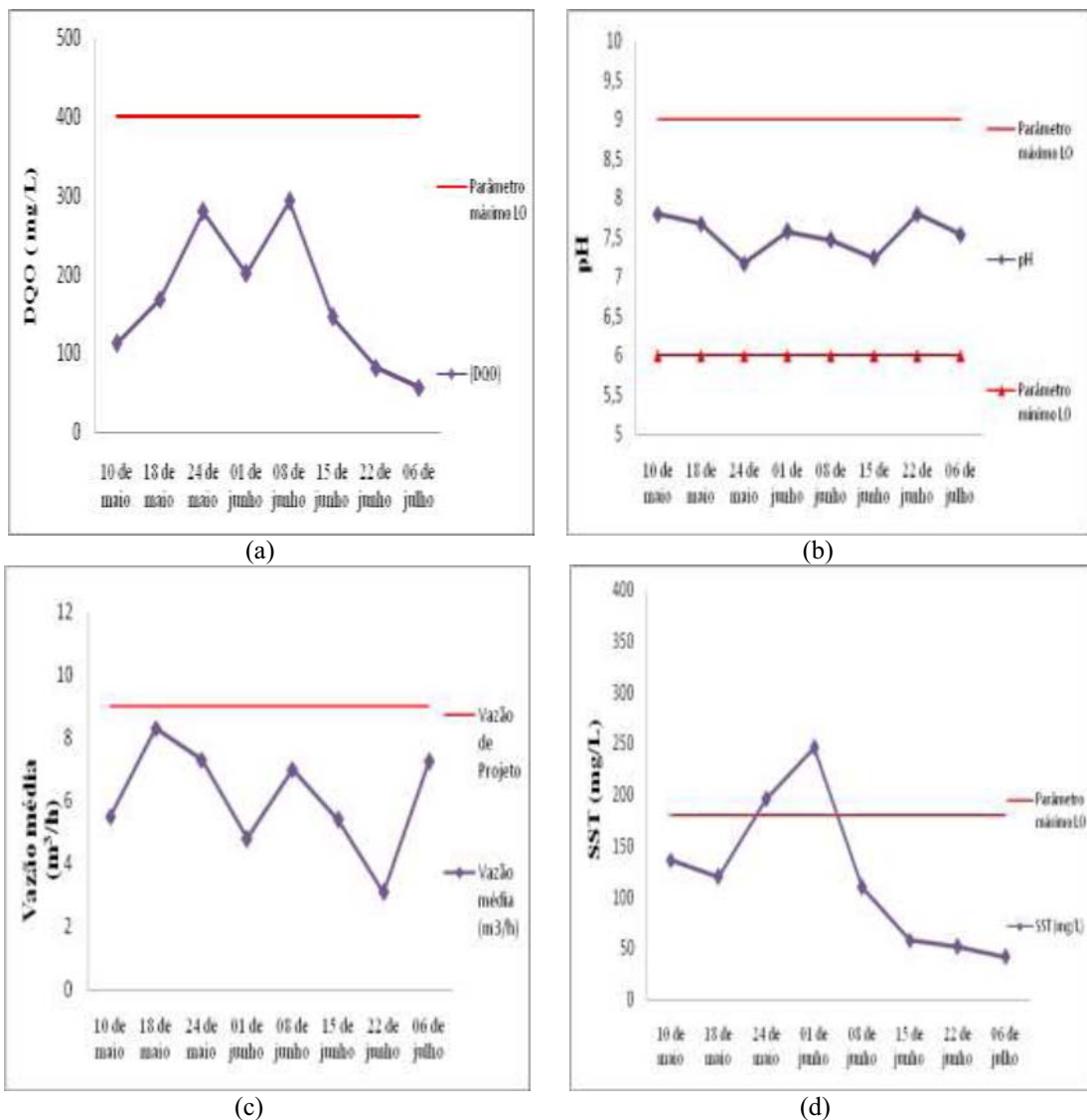


Figura 8: Caracterização do efluente tratado da ETE da Universidade de Passo Fundo, (a) DQO, (b) pH, (c) vazão média da ETE na saída para o corpo receptor, (d) SST.

A caracterização para a análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Figura 8(a), mostra pontos oscilantes entre o grupo de análises obtidas, houve maiores concentrações entre as datas de 24 de maio a 08 de junho. Todas as análises de DQO realizadas no período de caracterização mantiveram-se dentro dos parâmetros de controle da LO (Licença de Operação) N° 3863/2007 para a Universidade de Passo Fundo (parâmetro de controle: DQO menor ou igual a 400 mg/L).

Para o monitoramento de pH inicial do efluente, demonstrado em forma gráfica na Figura 8(b), observou-se uma constância nos valores obtidos, os mesmos mantiveram-se na faixa média de pH 7,5 com variação de $\pm 0,3$, respeitando os limites de parâmetros da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores de pH entre 6,0 e 9,0).

A vazão da ETE, Figura 8(c), mostra variação nos valores obtidos para o monitoramento deste parâmetro durante o período de caracterização, a média do grupo ficou em $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$ com variação de $\pm 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$, abaixo da vazão de projeto.

O monitoramento da temperatura durante o período de coleta das amostras, mostrou que o parâmetro máximo permitido para descarte segundo a LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: temperatura $< 40^\circ\text{C}$) foi respeitado. Os valores de temperatura monitorados variaram de 16°C a 20°C .

A caracterização para os Sólidos Suspensos Totais (SST), Figura 8(d), demonstra que no período de 10 de maio a 08 de junho houve uma maior concentração de particulados. Nas datas de 24 de maio e 01 de junho, os valores de SST ultrapassaram o parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores menores ou iguais a 180 mg/L).

A caracterização para o efluente referente às diferentes formas de fósforo é apresentada nas Figuras 9, 10, 11 e 12.

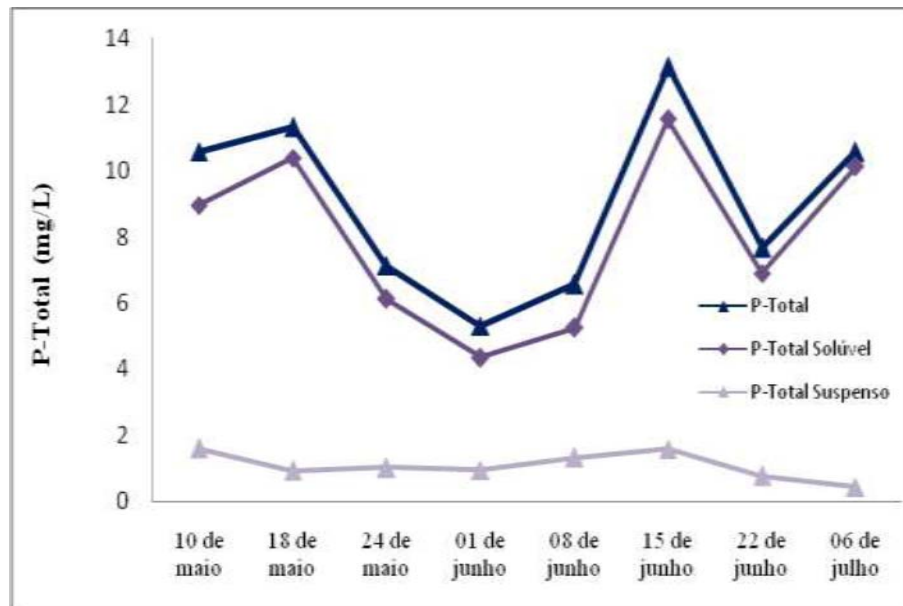


Figura 9: Caracterização para as diferentes formas de P-Total.

As análises de P-Total e P-Total Solúvel, Figura 9, demonstram um comportamento similar entre suas curvas, porém diferem em termos de valores de concentrações. A análise de P-Total representa todas as formas presentes do elemento fósforo (P) ligadas a partículas orgânicas ou inorgânicas com diâmetros maiores ou menores que $0,45 \mu\text{m}$. Enquanto que o fósforo total solúvel representa a mesma fração de formas de P, porém com diâmetro de partículas menores que $0,45 \mu\text{m}$. A partir das médias dos valores das concentrações durante o período de caracterização foi possível observar que a maior parte do P-Total presente no esgoto sanitário está na forma solúvel, representando 88% desta fração. O P-Total Particulado representou cerca de 12% desta fração, indicando que esta forma está presente em menores concentrações no esgoto sanitário final da ETE. O P-Total Particulado representa todas as formas particuladas do elemento fósforo (P) ligadas a partículas orgânicas ou inorgânicas com diâmetros maiores que $0,45 \mu\text{m}$. A LO N° 3863/2007 não estabelece valores de controle para o fósforo total, uma vez que na Resolução CONSEMA N° 128/2006 não são exigidos parâmetros de controle de concentração e eficiência para efluentes sanitários cujas vazões sejam inferiores a $1000 \text{ m}^3/\text{d}$.

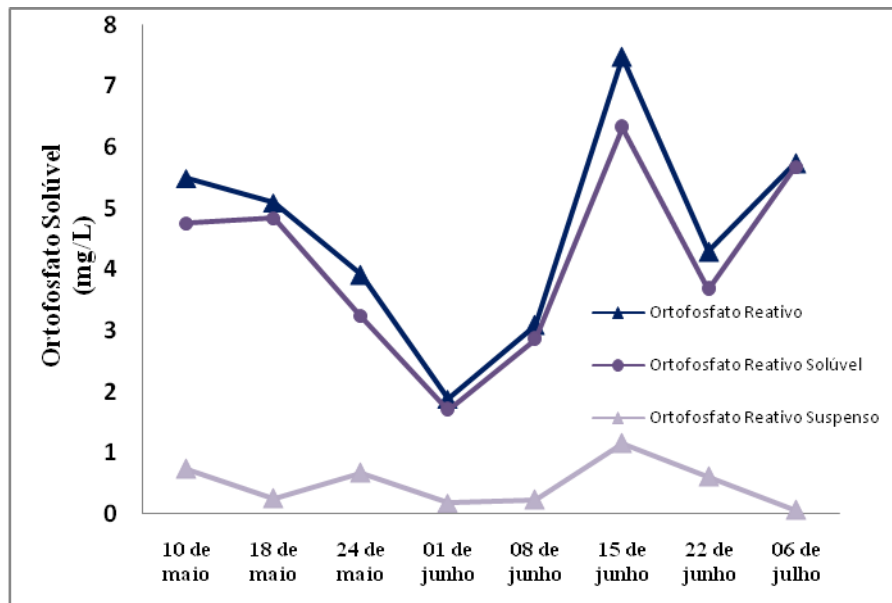


Figura 10: Caracterização para as diferentes formas de Ortofosfatos Reativos.

A Figura 10 traz valores de caracterização para as análises de ortofosfatos reativos e ortofosfatos reativos solúveis e mostram que o comportamento de ambas as análises foi similar. A diferença observada em relação às concentrações de ambas as análises foi mínima indicando que a maior parte de ortofosfatos presentes no esgoto sanitário está na forma solúvel. Na análise de caracterização para a fração de ortofosfato reativo na forma particulada verificou-se valores de concentração menores em comparação aos ortofosfatos reativos e ortofosfatos reativos solúveis, indicando que a forma particulada desta fração se encontra em menor porcentagem de concentração.

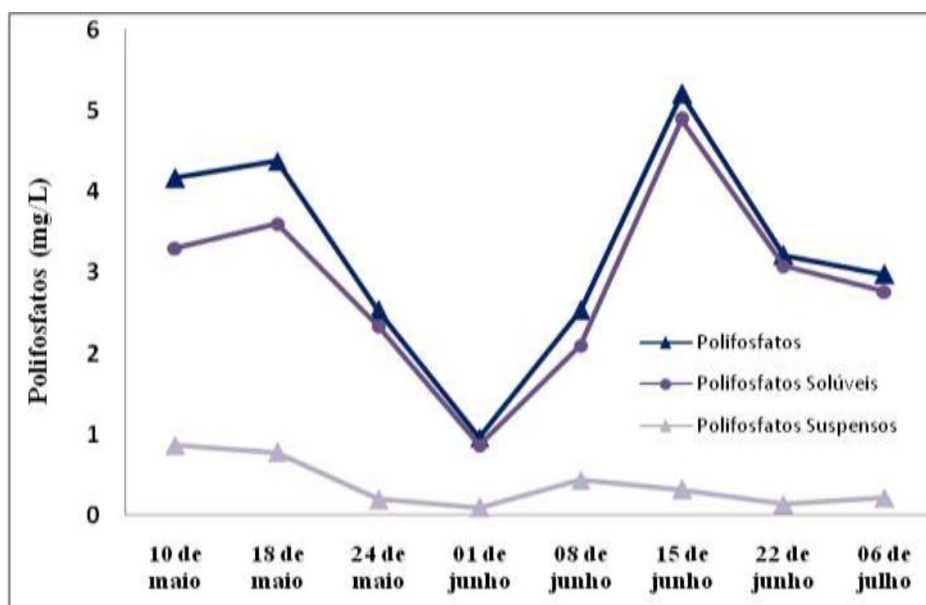


Figura 11: Caracterização para as diferentes formas de Polifosfatos.

A caracterização para as formas de polifosfatos, descritas na Figura 11, mostram similaridade no comportamento das curvas entre as análises de polifosfatos e polifosfatos solúveis, apenas diferindo-se em termos de valores de concentrações. Os polifosfatos solúveis, partículas obtidas da polimerização de ortofosfatos, cujos diâmetros são inferiores a $0,45 \mu\text{m}$, apresentaram-se em maior porcentagem de concentração. Os polifosfatos particulados, cujos tamanhos de partículas são superiores a $0,45 \mu\text{m}$, estiveram presentes em menor porcentagem em relação as formas fracionadas de polifosfatos.

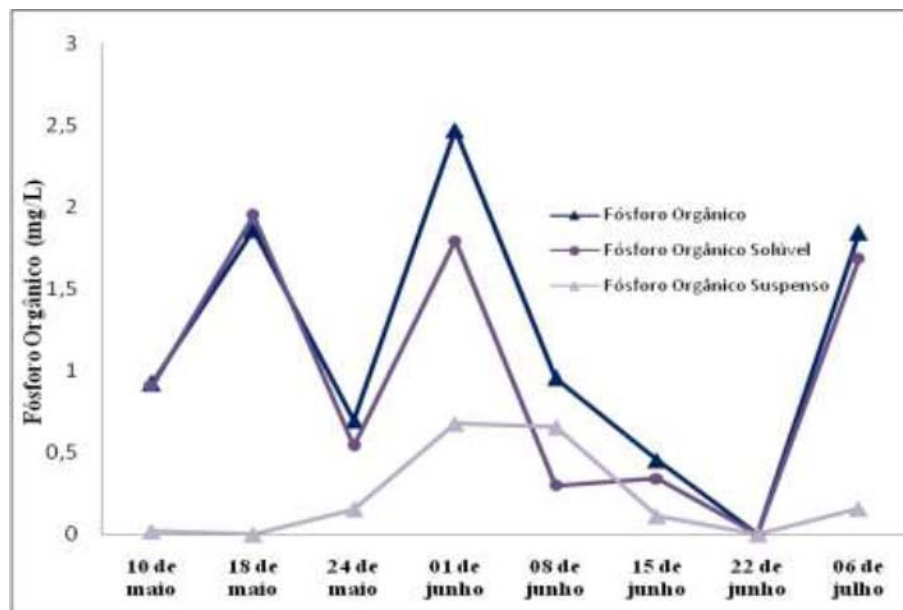


Figura 12: Caracterização para as diferentes formas de Fósforo Orgânico.

A Figura 12 traz as concentrações obtidas durante o período de caracterização para as análises de P-Orgânico, P-Orgânico Solúvel e P-Orgânico Particulado. Não foram detectadas concentrações para a forma particulada de P-Orgânico nas datas de 10 e 18 de maio e para as formas de P-Orgânico, P-Orgânico Solúvel e P-Orgânico Particulado na data de 22 de junho. Esse fato pode ser explicado pela quantificação destas frações estarem próximas ao limite mínimo de detecção do método.

A partir das análises das diferentes concentrações de fósforo, durante o período de caracterização desta pesquisa, observou-se que a fração de Ortofosfatos esteve presente em maior porcentagem, 52% do total, enquanto que os polifosfatos representaram 35% do total e o P-Orgânico apenas 13%.

A especiação química do fósforo em esgotos sanitários indica que os fosfatos representam a maior quantidade do fósforo presente no efluente (GUALBERTO, 2009). A quantificação durante o período de caracterização mostrou que os fosfatos continuam como

forma predominante no esgoto sanitário, mesmo após o efluente ter sido submetido ao tratamento biológico aeróbio e anaeróbio.

As coletas de amostras e dados para a caracterização desta pesquisa ocorreram nos meses de maio, junho e julho de 2010.

4.2 Tratamento Físico-químico

4.2.1 Cloreto Férrico

Após o tratamento físico-químico, Figura 13, observou-se que a adição do coagulante cloreto férrico (FeCl_3) fez com que o parâmetro de pH diminuísse. O caráter ácido do sal contribuiu para que os valores de pH se aproximassem ao parâmetro ótimo de precipitação. Valores de pH situados entre 6,0 e 6,5 são indicados para a precipitação química do fósforo com o uso de sais de ferro (SNOEYINK et al., 1980; BENJAMIN, 2002 apud MARGUTI, 2008).

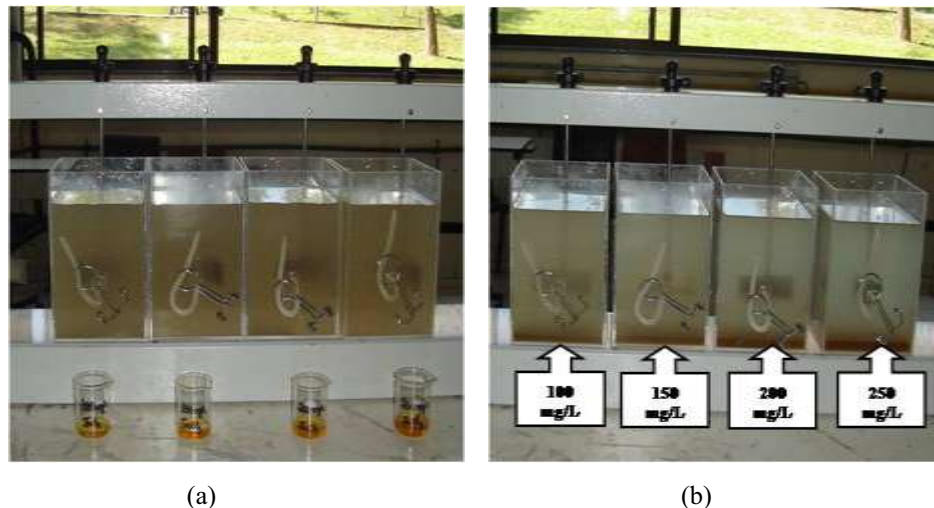


Figura 13: Fotos do tratamento físico-químico para o cloreto férrico: (a) antes e (b) após o tratamento.

As Figuras 14 e 15 trazem a quantificação e o monitoramento do efluente em estudo nos parâmetros de DQO, pH, SST e fósforo em suas diferentes frações.

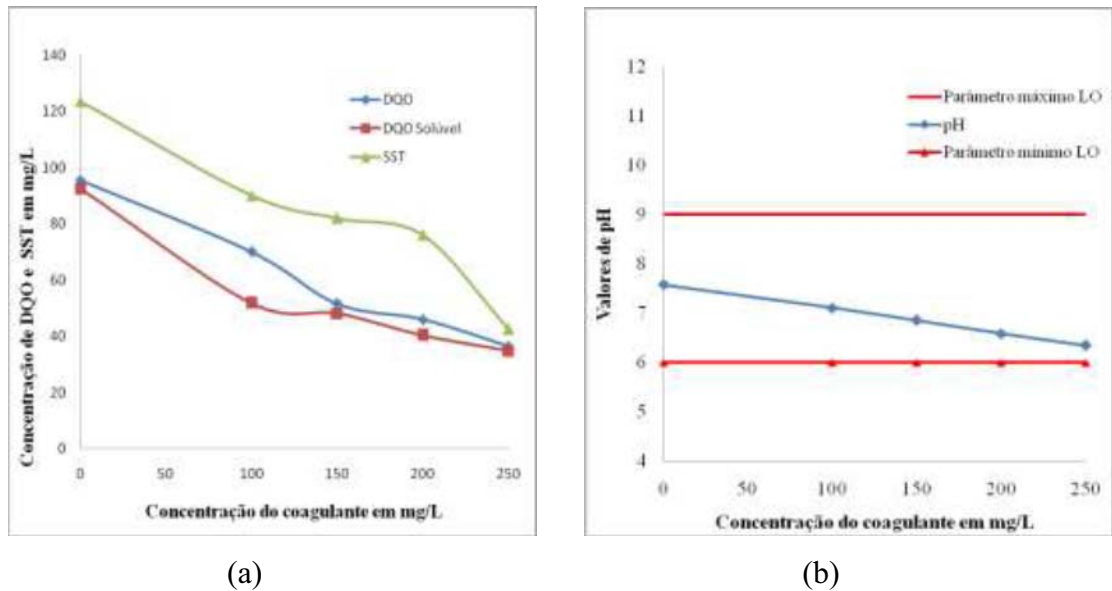
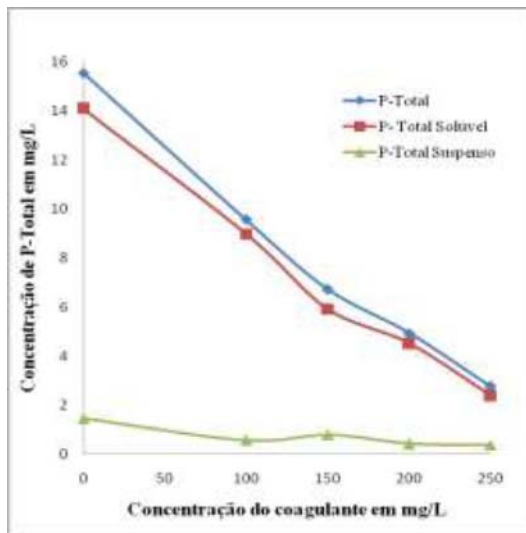


Figura 14: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico, (a) DQO, DQO Solúvel e SST, (b) Monitoramento de pH.

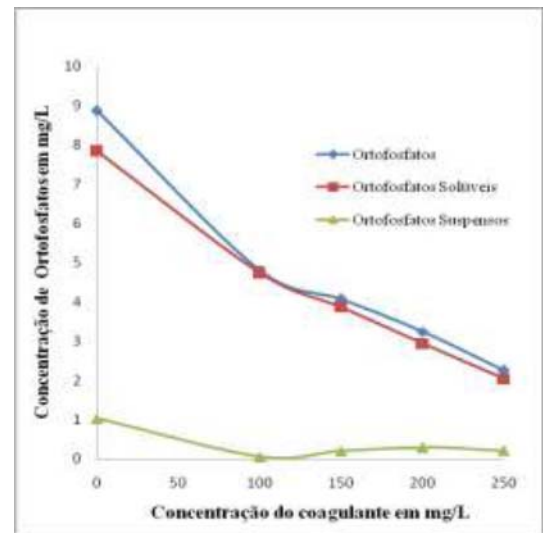
A quantificação para a análise de DQO e DQO solúvel, Figura 14(a), mostra similaridade para o comportamento das curvas para as duas análises, apenas há um distanciamento nos valores com o uso da concentração de 100 mg/L. Para ambas análises observa-se um comportamento decrescente nas curvas a medida que a concentração do coagulante aumenta. Todas as análises de DQO, após o tratamento físico-químico, mantiveram-se dentro dos parâmetros de controle da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: DQO menor ou igual a 400 mg/L).

A análise de SST teve um comportamento de semelhança na curva em relação às curvas das análises de DQO e DQO solúvel, diferenciando-se apenas por serem valores maiores de concentração. A curva teve comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. Os valores de SST não ultrapassaram o parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores menores ou iguais a 180 mg/L).

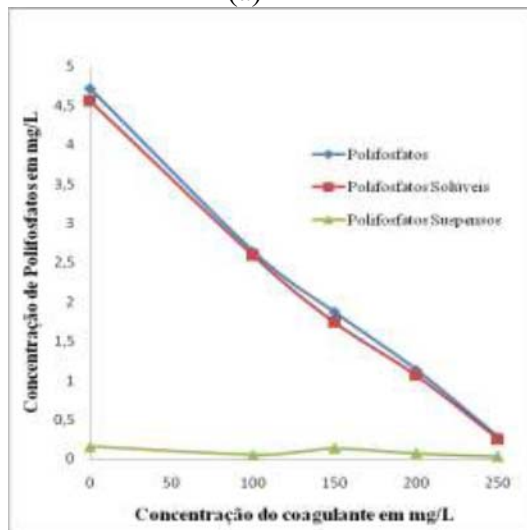
O monitoramento de pH, após o tratamento físico-químico, mostra um comportamento decrescente, Figura 14(b), o mesmo reduziu seu valor a medida em que a concentração do reagente aumentou, porém em todas as concentrações utilizadas do coagulante, os valores permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores entre 6,0 e 9,0).



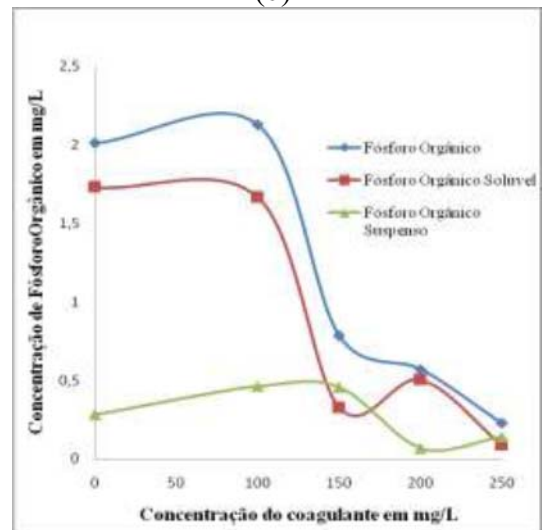
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 15: Análises após tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico, (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspensão; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspensos; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspensos; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspensão.

Para as análises do fósforo total e fósforo total solúvel, Figura 15(a), a quantificação mostrou um comportamento similar entre as curvas de ambas as análises, porém diferem-se em termos de valores de concentrações. Houve também o comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A maior parte do fósforo total presente no efluente esteve na forma solúvel. A quantificação para a forma particulado do fósforo total foi baixa, indicando que esta forma particulada está presente em menor porcentagem. Apesar de baixas concentrações houve um comportamento decrescente da curva, compatível com as análises de fósforo total e fósforo total solúvel, em relação ao aumento da concentração do coagulante, tendo oscilação apenas na concentração de 150 mg/L.

As análises de ortofosfatos e ortofosfatos na forma solúvel (Figura 15(b)) tiveram comportamento similar na quantificação, observado através das curvas gráficas, diferindo-se em termos de valores de concentrações. As curvas também mostram um comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. Pelos valores quantificados foi possível constatar que a maior parte dos ortofosfatos presentes no efluente está na forma solúvel. A quantificação para os ortofosfatos suspensos, apesar das baixas concentrações, mostra um comportamento decrescente, compatível com as análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis em relação ao aumento da concentração do coagulante. Houve oscilação apenas na concentração de 100 mg/L, ocasionada pela baixa diferença entre os valores de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis. A forma particulada dos ortofosfatos esteve presente em menor porcentagem de concentração em relação as formas fracionadas dos ortofosfatos.

A quantificação para os polifosfatos e para os polifosfatos na forma solúvel tiveram comportamento de semelhança, apenas diferindo em termos de valores de concentração, a Figura 15(c) mostra a declínio das curvas versus o aumento da concentração do coagulante. Os polifosfatos suspensos oscilaram, porém também apresentaram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A maior porcentagem de polifosfatos presentes está na forma solúvel, enquanto que a menor foi observada na forma particulada.

A Figura 15(d) traz a quantificação para o fósforo orgânico e o fósforo orgânico solúvel, ambas as formas das frações tiveram curvas similares de comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A forma solúvel do fósforo orgânico esteve presente em maior porcentagem. O fósforo orgânico suspenso se manteve constante nas concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L. A partir da concentração de 150 mg/L houve um

comportamento decrescente da curva versus o aumento da concentração do coagulante. A forma particulada esteve presente em menor porcentagem entre as formas fracionadas do fósforo orgânico.

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto férrico em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação está descrito no Apêndice A.

4.2.2 Sulfato de Alumínio

O monitoramento após o tratamento físico-químico com o uso do coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (Figura 16), mostrou que após a adição das diferentes concentrações, o pH atingiu valores próximos ao parâmetro ótimo para o uso deste agente coagulante, situado na faixa de pH 7 segundo Santos (2003).

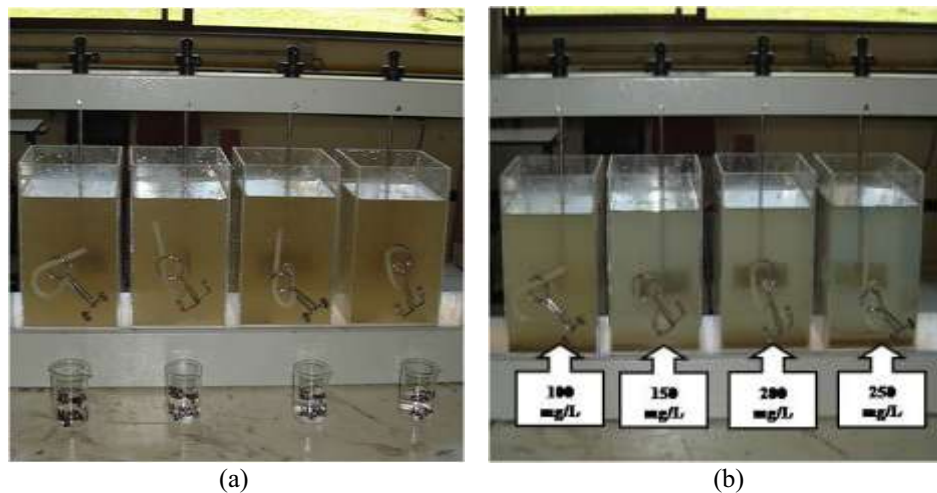


Figura 16: Fotos do tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio: (a) antes e (b) após o tratamento.

As Figuras 17 e 18 trazem a quantificação e o monitoramento nos parâmetros de DQO, pH, SST e fósforo em suas diferentes frações após o tratamento físico-químico aplicado.

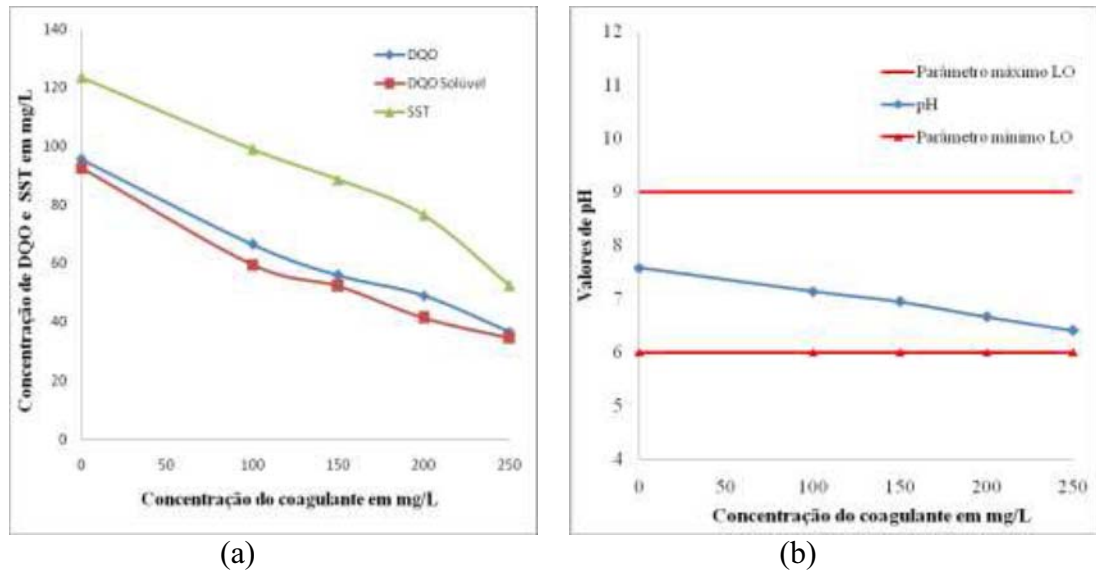


Figura 17: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio, (a) DQO, DQO Solúvel e SST, (b) Monitoramento de pH.

As concentrações para as análises de DQO e DQO solúvel (Figura 17(a)) mostram similaridade no comportamento das curvas para as duas análises, em ambas análises observa-se um comportamento decrescente nas curvas à medida em que a concentração do coagulante aumenta. Todas análises de DQO, após o tratamento físico-químico, mantiveram-se dentro dos parâmetros de controle da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: DQO menor ou igual a 400 mg/L).

A análise de SST teve um comportamento semelhante na curva em relação às curvas das análises de DQO e DQO solúvel, diferenciando-se apenas por serem valores maiores de concentração, as concentrações também apresentam comportamento decrescente de valores à medida que a concentração do coagulante aumentou. Os valores de SST não ultrapassaram o parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores menores ou iguais a 180 mg/L).

O monitoramento de pH da Figura 17(b) mostra que este parâmetro decresceu à medida que a concentração do coagulante aumentou, o caráter ácido do sulfato de alumínio contribuiu para que os valores de pH reduzissem. Para todas as concentrações do coagulante utilizadas os valores de pH permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores de pH entre 6,0 e 9,0).

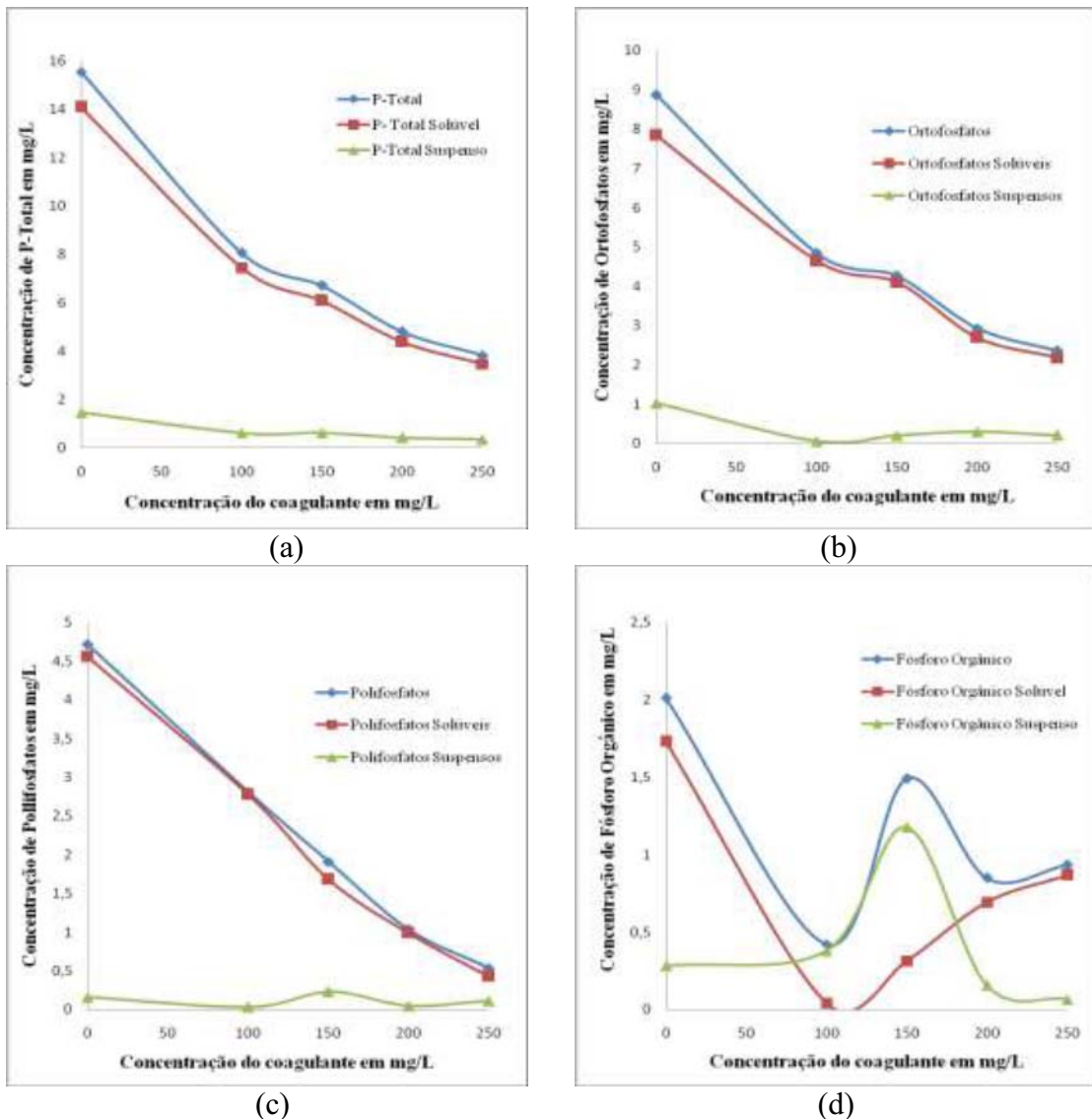


Figura 18: Análises após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio, (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspenso; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspenso; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspenso; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspenso.

Para a análise do fósforo total e fósforo total solúvel, Figura 18(a), a quantificação mostrou um comportamento similar entre as curvas gráficas de ambas análises, porém diferiram-se em termos valores de concentrações. As curvas tiveram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A quantificação para o fósforo total suspenso apesar da baixa mostra um comportamento decrescente compatível com as análises de fósforo total e do fósforo total solúvel, à medida que a concentração do coagulante aumenta, sendo constante apenas nas concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L. A

maior quantificação de fósforo presente no efluente para o P-Total foi observada na forma solúvel, enquanto que a menor quantificação foi detectada na forma particulada.

Para as análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis (Figura 18(b)) é possível observar um comportamento na quantificação similar entre as curvas gráficas, diferindo-se em termos valores de concentrações, as curvas também mostram um comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A quantificação para o ortofosfatos suspensos, apesar da baixa, mostra um comportamento decrescente à medida que ocorre o aumento da concentração do coagulante, tendo oscilação apenas na concentração de 100 mg/L, ocasionada pela baixa diferença entre os valores de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis. A forma solúvel foi a que apresentou maior porcentagem entre as diferentes frações de ortofosfatos, enquanto que a menor fração presente foi observada na forma particulada.

A quantificação dos polifosfatos e dos polifosfatos solúveis tiveram comportamento de semelhança gráfica, apenas diferindo em termos de valores de concentração, a Figura 18(c) mostra a declínio das curvas versus o aumento da concentração do agente coagulante. Os polifosfatos suspenso oscilaram, em especial na concentração de 150 mg/L, porém também apresentaram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A forma solúvel foi a que apresentou maior porcentagem entre as diferentes frações de polifosfatos, enquanto que a menor fração presente encontra-se na forma particulada.

A Figura 18(d) mostra a quantificação para o fósforo orgânico, fósforo orgânico solúvel e fósforo orgânico suspenso. A quantificação desta forma oscilou em especial para as concentrações do coagulante em 100 mg/L e 150 mg/L, o que por sua vez descaracterizou o comportamento decrescente das curvas em relação ao aumento progressivo da concentração do agente coagulante. As oscilações podem ter ocorrido por essa fração de fósforo ser encontrada em menores concentrações no efluente sanitário em estudo, estando próximas ao limite mínimo de detecção do método analítico.

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante sulfato de alumínio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação está descrito no Apêndice B.

4.2.3 Óxido de Cálcio

Para o uso do agente coagulante óxido de cálcio (CaO) houve a necessidade de ajuste de pH com o intuito de que o ponto ótimo para coagulação fosse atingido, que segundo Santos (2003) estaria na faixa de pH 9.

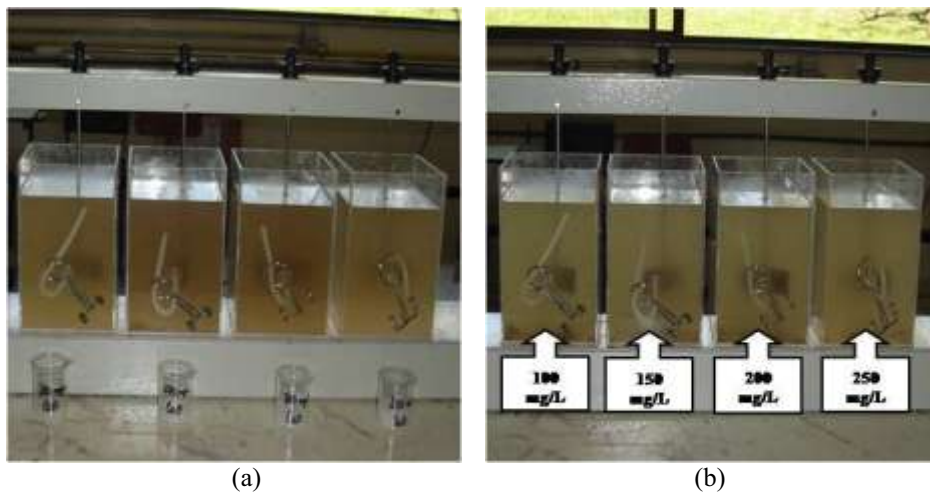


Figura 19: Fotos do tratamento físico-químico para o óxido de cálcio: (a) antes e (b) após o tratamento.

As Figuras 20 e 21 mostram a quantificação e o monitoramento do efluente em estudo nos parâmetros de DQO, pH, SST e fósforo em suas diferentes frações.

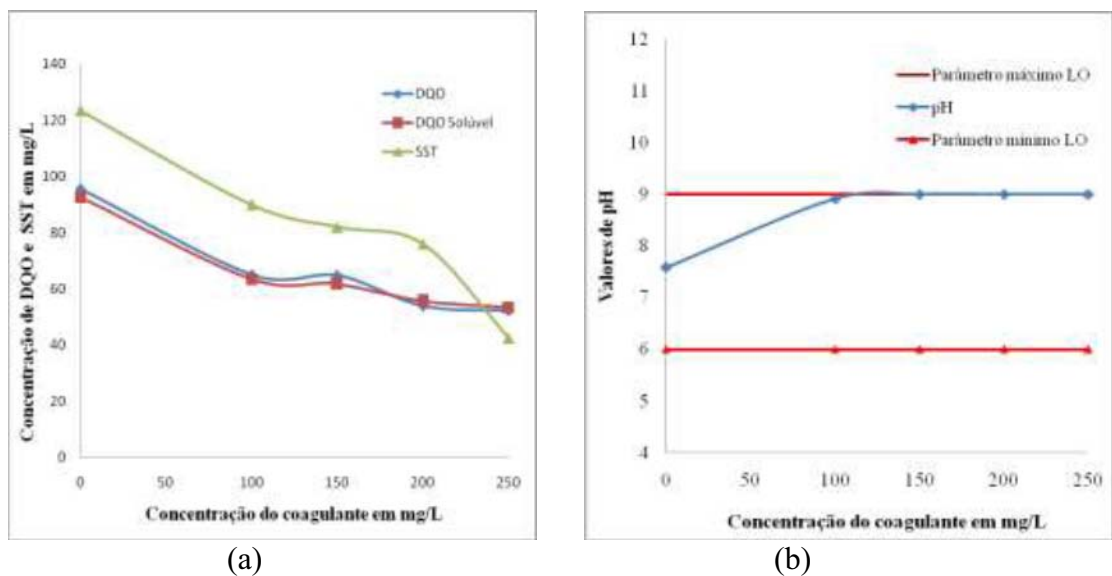
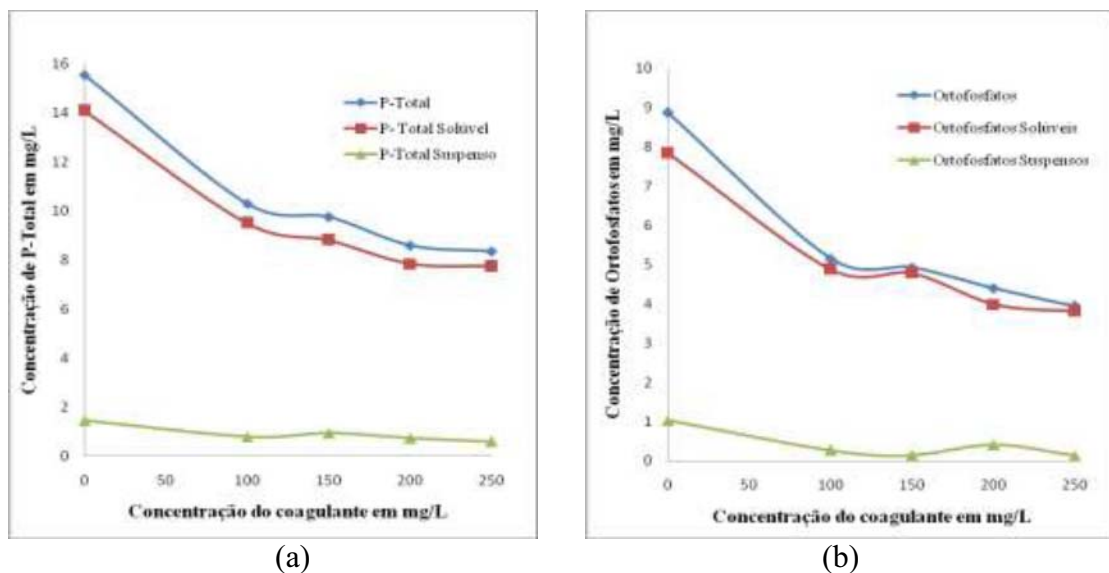


Figura 20: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio, (a) DQO, DQO Solúvel e SST, (b) Monitoramento de pH.

O gráfico de quantificação para a análise de DQO, DQO solúvel (Figura 20(a)) mostra similaridade para o comportamento das curvas, ambas decrescem à medida que a concentração do coagulante aumentou. Todas as análises de DQO, após o tratamento físico-químico, mantiveram-se dentro dos parâmetros de controle da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: DQO menor ou igual a 400 mg/L).

A análise de SST teve um comportamento de semelhança na curva em relação às curvas das análises de DQO e DQO solúvel, diferenciando-se por serem valores maiores de concentração. As concentrações de SST decresceram à medida que a concentração do coagulante aumentou. Os valores de SST não ultrapassaram o parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores menores ou iguais a 180 mg/L).

O monitoramento de pH após o tratamento físico-químico (Figura 20(b)), mostrou um comportamento constante de valores após o ajuste para o ponto ótimo de coagulação. Os valores de monitoramento mostram que o pH esteve para todas as concentrações dentro dos parâmetros estabelecidos pela LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores de pH entre 6,0 e 9,0), porém no limite máximo do especificado.



(Figura 21: Análises após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio continua na página 53).

(Continuação da Figura 21).

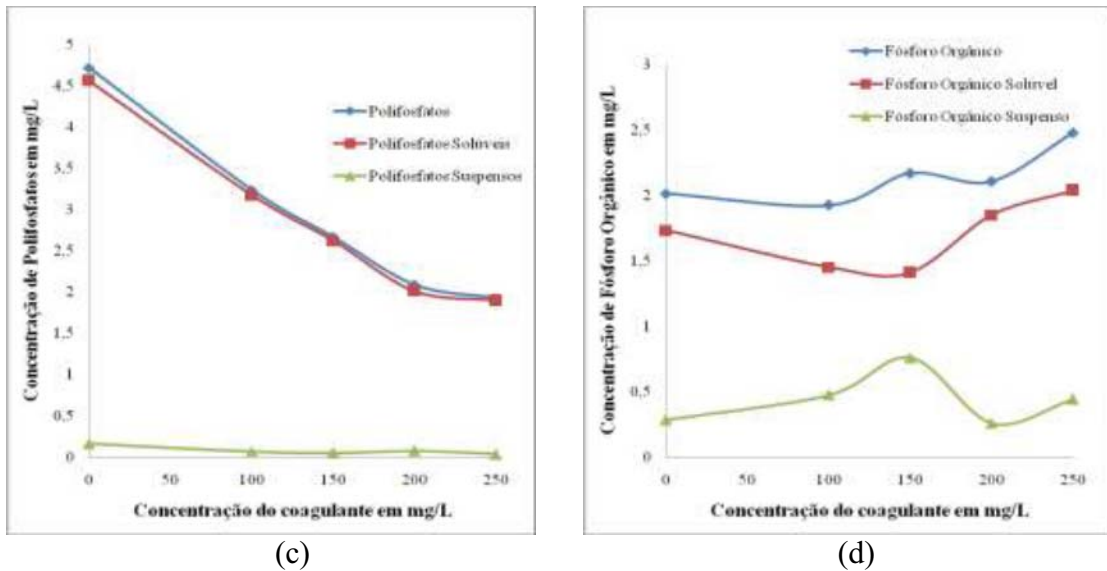


Figura 21: Análises após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio, (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspenso; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspensos; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspensos; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspenso.

A Figura 21(a) mostra a quantificação para análises de fósforo total e fósforo total solúvel, o comportamento das curvas foram similares, porém diferem-se em termos de valores de concentrações, as curvas decresceram à medida em que ocorre o aumento da concentração do reagente. A quantificação para o fósforo total suspenso, apesar da baixa, mostrou um comportamento decrescente compatível com as análises de fósforo total e do fósforo total solúvel, em relação à declividade com o aumento da concentração do coagulante. A forma fracionada que apresentou maior porcentagem em relação às três formas de fósforo total foi a solúvel e a menor observada a particulada.

As análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis, Figura 21(b), mostram um comportamento similar na quantificação, visivelmente observado nas curvas gráficas, diferindo-se em termos valores de concentrações. As curvas também mostraram um comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do agente coagulante. A quantificação para os ortofosfatos suspensos, apesar das menores concentrações, mostra um comportamento decrescente compatível com as análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis em relação à declividade das curvas com o aumento da concentração do coagulante, tendo oscilação apenas na concentração de 200 mg/L. Observou-se que a maior parcela de ortofosfatos presentes no efluente esteve presente na forma solúvel, enquanto que a menor foi observada na forma particulada.

A quantificação para as análises de polifosfatos e polifosfatos solúveis (Figura 21(c)), mostra um comportamento semelhante entre as curvas, indicando a proximidade das

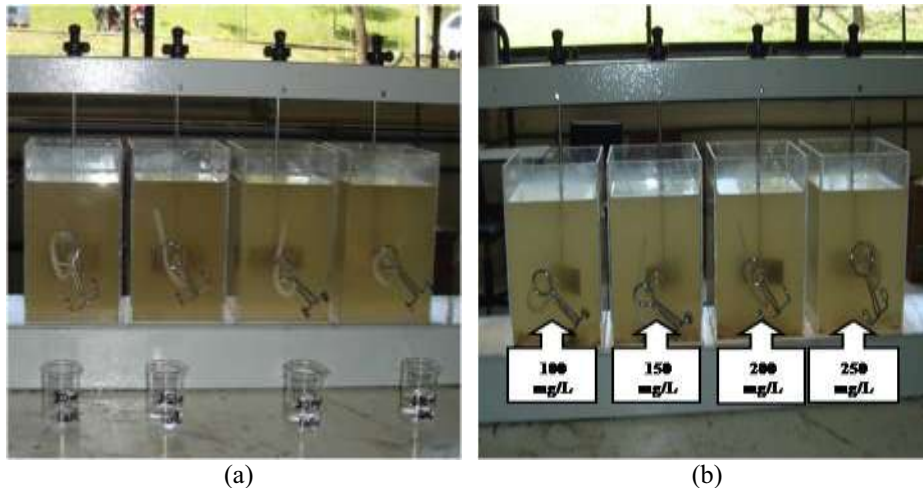
concentrações. As curvas apresentaram declínio nas concentrações com o aumento da concentração do coagulante. Os polifosfatos suspenso, apesar de apresentarem menores valores de concentração, também tiveram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A maior parcela de polifosfatos presente no efluente esteve presente na forma solúvel, observado pela aproximação das concentrações de polifosfatos e polifosfatos solúveis, enquanto que a menor foi observada na forma particulada.

A Figura 21(d) mostra a quantificação para o fósforo orgânico e o fósforo orgânico solúvel, ambas as formas das frações tiveram curvas similares de comportamento, porém estas frações tenderam a crescer em relação ao aumento da concentração do coagulante, diferenciando-se dos demais comportamentos. Para o fósforo orgânico particulado, ocorreu oscilação na concentração de 150 mg/L, as demais concentrações mantiveram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A maior parcela de fósforo orgânico presente no efluente esteve presente na forma solúvel, enquanto que a menor foi observada na forma particulada. As oscilações e a diferença de comportamento podem ter ocorrido por esta fração do fósforo apresentar baixas concentrações, próximas ao limite mínimo de detecção do método.

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante óxido de cálcio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação está descrito no Apêndice C.

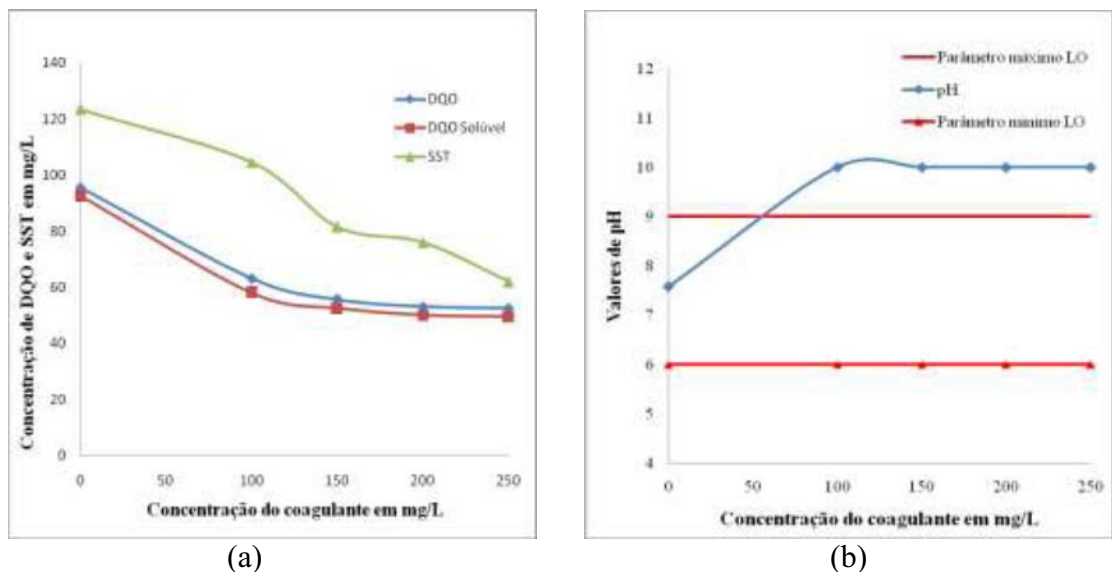
4.2.4 Cloreto de Cálcio

Para o uso do coagulante cloreto de cálcio (CaCl_2), tratamento físico-químico aplicado da Figura 22, houve a necessidade de ajuste de pH de maneira que o ponto ótimo para a coagulação fosse atingido, segundo Santos (2003) estaria na faixa de pH 10.



(a) (b)
 Figura 22: Fotos do tratamento físico-químico para o cloreto de cálcio: (a) antes e (b) após o tratamento.

As Figuras 23 e 24 mostram a quantificação e o monitoramento do efluente em estudo nos parâmetros de DQO, pH, SST e fósforo em suas diferentes frações.



(a) (b)
 Figura 23: Monitoramento e análises após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio, (a) DQO, DQO Solúvel e SST, (b) Monitoramento de pH.

O gráfico de quantificação para a análise de DQO, DQO solúvel (Figura 23(a)) mostra similaridade para o comportamento das curvas de ambas as análises, as curvas decrescem à medida que a concentração do coagulante aumentou. Todas análises de DQO, após o tratamento físico-químico, mantiveram-se dentro dos parâmetros de controle da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: DQO menor ou igual a 400 mg/L).

A quantificação da análise de SST, assim como as análises de DQO e DQO solúvel, apresentou comportamento decrescente de valores à medida que a concentração do coagulante

aumentou. Os valores de SST não ultrapassaram o parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores menores ou iguais a 180 mg/L).

Para o monitoramento de pH após o tratamento físico-químico, o comportamento do mesmo se manteve constante (Figura 23(b)), uma vez que houve ajuste deste para o ponto ótimo de coagulação. Os valores do monitoramento mostram que este reagente excedeu os limites estabelecidos no parâmetro máximo da LO N° 3863/2007 (parâmetro de controle: valores de pH entre 6,0 e 9,0), em todas as concentrações do coagulante utilizadas.

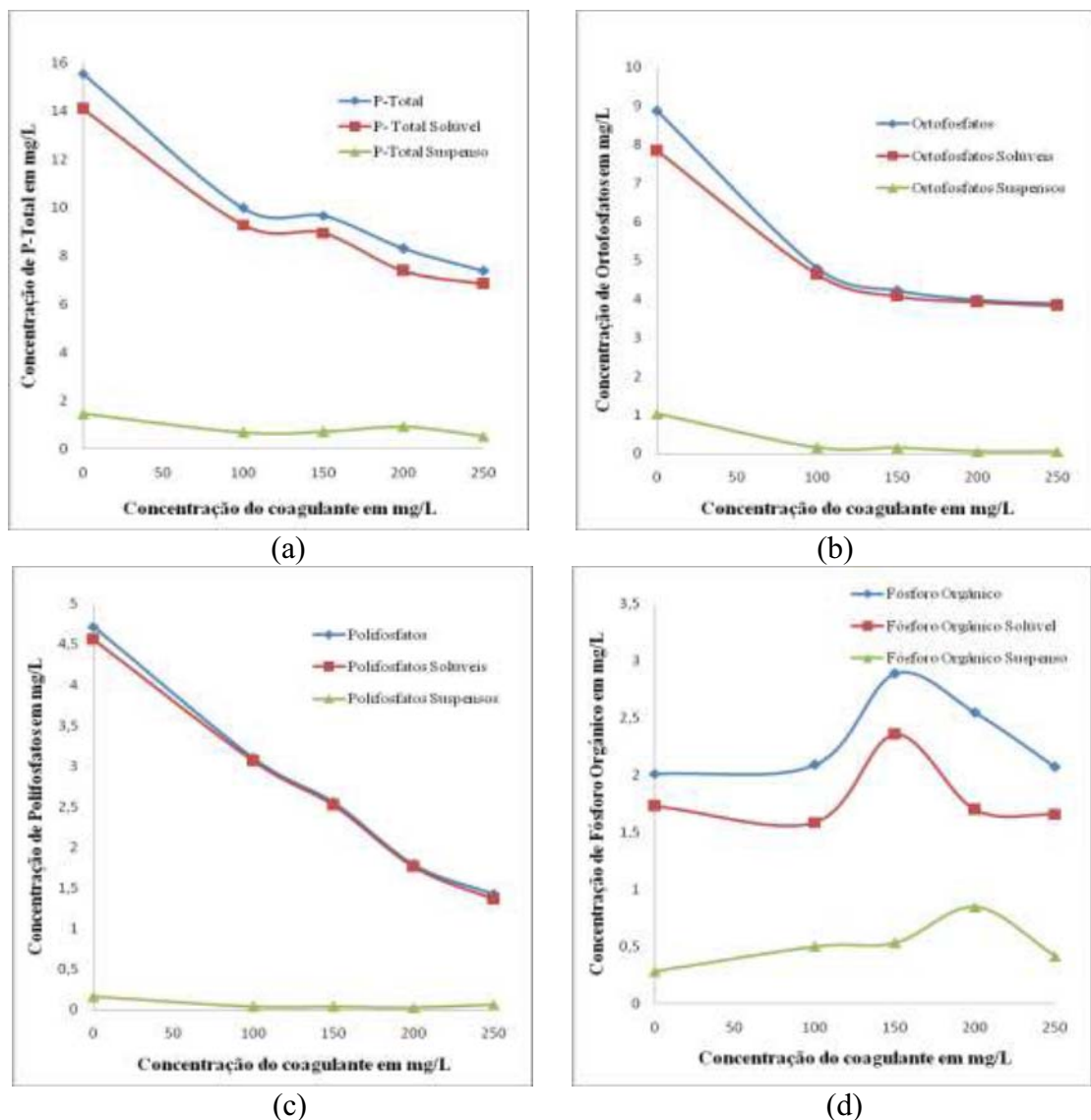


Figura 24: Análises após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio, (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspense; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspense; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspense; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspense.

Para a análise do fósforo total e fósforo total solúvel (Figura 24(a)), a quantificação mostrou similaridade entre as curvas, porém diferiram em termos valores de concentrações,

ambas tiveram comportamento decrescente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A quantificação para o fósforo total suspenso, apesar da baixa, mostra um comportamento decrescente compatível com as análises de fósforo total e do fósforo total solúvel, em relação à declividade com o aumento da concentração do coagulante, tendo oscilação apenas na concentração de 200 mg/L. A maior parcela da fração de fósforo total se apresentou na forma solúvel, enquanto que a menor esteve na forma particulada.

As análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis (Figura 24(b)) mostram um comportamento similar na quantificação entre as curvas gráficas, diferindo-se em termos valores de concentrações. Para as concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L a similaridade entre os valores de concentração foram próximas o que ocasionou uma sobreposição aparente entre as curvas. Observou-se o comportamento decrescente das concentrações em relação ao aumento da concentração do coagulante. Para a quantificação dos ortofosfatos suspensos, apesar das baixas concentrações, o comportamento da curva foi decrescente compatível com as análises de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis, em relação a declividade com o aumento da concentração do coagulante. A maior parcela da fração desta forma se apresentou na forma solúvel, enquanto que a menor esteve na forma particulada.

A quantificação dos polifosfatos e dos polifosfatos solúveis mostrou um comportamento semelhante, apenas diferindo em termos de valores de concentrações. Para as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L a similaridade entre os valores de concentração foram próximos o que ocasionou uma sobreposição aparente entre as curvas. A Figura 24(c) mostra um declínio das curvas versus o aumento da concentração do coagulante. Os polifosfatos suspenso tiveram baixas concentrações ocasionadas pela aproximação de valores entre os polifosfatos e os polifosfatos solúveis. Para os polifosfatos a maior parcela de fração esteve na forma solúvel, enquanto que a menor na forma particulada.

A Figura 24(d) mostra a quantificação para o fósforo orgânico e o fósforo orgânico solúvel, ambas as formas das frações tiveram curvas similares de comportamento, havendo oscilação para a concentração de 150 mg/L. O fósforo orgânico suspenso oscilou na concentração de 200 mg/L. Para as demais concentrações do fósforo orgânico suspenso houve diferenças mínimas entre os valores de concentrações. A maior parcela desta forma de fósforo se apresentou na forma solúvel, enquanto que a menor na forma particulada.

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto de cálcio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação está descrito no Apêndice D.

4.3 Eficiência do Tratamento Físico-Químico

4.3.1 Eficiência de remoção para o Cloreto Férrico

As eficiências das remoções nas análises de DQO, SST e diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto férrico (FeCl_3) encontram-se nas Figuras 25 e 26.

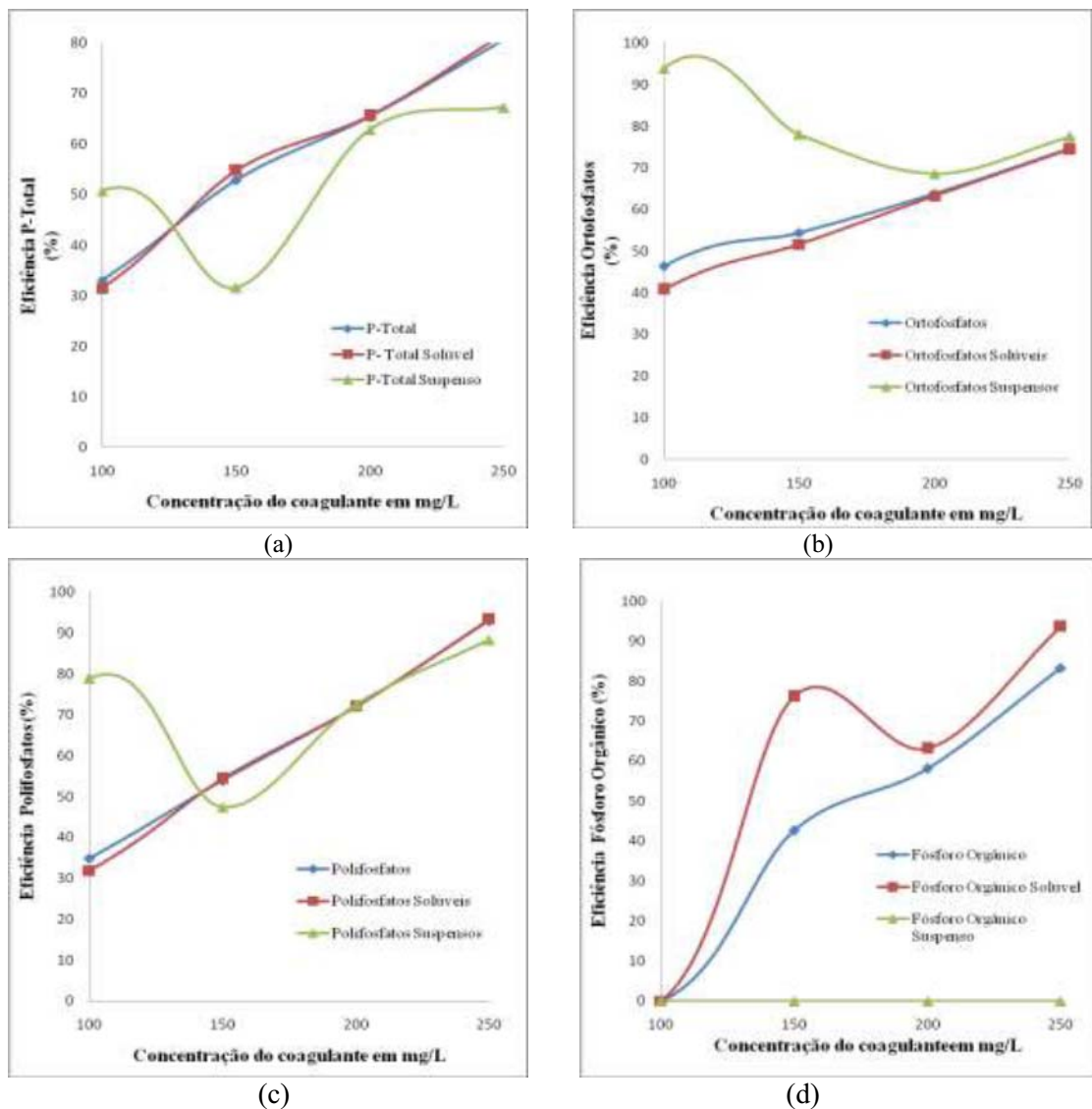


Figura 25: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico: (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspense; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspense; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspense; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspense.

As eficiências para as análises de fósforo total e fósforo total solúvel (Figura 25(a)) apresentaram similaridade e um comportamento ascendente à medida que ocorreu o aumento

da concentração do coagulante. Eficiências próximas para estas análises mostraram um comportamento de sobreposição aparente entre as curvas para a concentração de 200 mg/L. As eficiências para o fósforo total e fósforo total solúvel variaram de 31% a 82% para todas as concentrações do coagulante. Houve oscilação na curva do fósforo total suspenso na concentração de 100 mg/L, devido à eficiência ter sido superior ao fósforo total e ao fósforo total solúvel na mesma faixa de concentração do coagulante. Apesar da oscilação, o fósforo total suspenso também teve comportamento ascendente observado na curva gráfica à medida que ocorreu o aumento da concentração do agente coagulante. A eficiência de remoção para o fósforo total suspenso variou de 32% a 67%. As maiores remoções observadas foram para a forma solúvel do P-total, forma que representou a maior quantificação do elemento P presente no efluente sanitário em estudo. Marguti et al. (2008) descrevem em seus experimentos com o uso do coagulante cloreto férrico, em concentrações que variaram de 80 mg/L a 200 mg/L, remoções máximas a partir de efluentes sanitários finais de ETEs em torno de 80% a 90% para o P-Total. Sinelli et al. (2002) obtiveram para a mesma forma eficiências na ordem de 86% a 97% a partir de concentrações do coagulante situadas entre 40 mg/L e 225 mg/L.

A Figura 25(b) mostra as eficiências para as análises de ortofosfatos, ortofosfatos solúveis e ortofosfatos na forma particulada. Observa-se pelas curvas dos ortofosfatos e ortofosfatos solúveis um comportamento similar ascendente à medida que ocorre o aumento da concentração do coagulante. Semelhanças na porcentagem de remoção nas concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do reagente causaram uma aparente sobreposição nas curvas de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis. As eficiências para os ortofosfatos e ortofosfatos na forma solúvel variaram de 41% a 75%. Para os ortofosfatos particulados as eficiências de remoções estiverem entre 68% e 94%. O cálculo das médias para as eficiências dos ortofosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de ortofosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de ortofosfatos presentes no efluente. Sinelli et al. (2002) apresentaram a partir de seus experimentos eficiências na faixa de 71% a 96% para a forma de ortofosfatos, enquanto Marguti et al. (2008) obtiveram eficiências para a forma de ortofosfatos solúveis entre 80% e 95%.

As eficiências para os polifosfatos, polifosfatos solúveis e polifosfatos suspensos estão discriminadas na Figura 25(c). Houve semelhança de comportamento entre as curvas de polifosfatos e polifosfatos solúveis, ambas mostram comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A aproximação de valores de eficiência nas

concentrações de 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L causaram um sobreposição aparente das curvas. As eficiências de remoções para os polifosfatos e os polifosfatos solúveis foram de 32% a 93%. As eficiências para a forma particulada dos polifosfatos estiveram entre 47% e 88%, tendo remoção superior na concentração de 100 mg/L e inferiores nas demais concentrações em comparação aos polifosfatos e polifosfatos solúveis. O cálculo das médias para as eficiências dos polifosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de polifosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de polifosfatos presentes no efluente. Marguti et al. (2008) apresentaram eficiências para a forma solúvel de polifosfatos entre 80% e 95%.

Na Figura 25(d) encontram-se as eficiências para o P-Orgânico, P-Orgânico Solúvel e P-Orgânico Suspenso. A análise das curvas para o P-Orgânico e o P-Orgânico Solúvel mostra um distanciamento causado pela maior eficiência obtida na concentração 150 mg/L para o P-Orgânico Solúvel, isso descaracterizou a similaridade das curvas no gráfico, porém as mesmas indicaram comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante, suas eficiências variaram respectivamente de 42% a 83% e 76% a 94%. Não houve eficiências calculadas para a concentração de 100 mg/L nas análises de P-Orgânico e P-Orgânico Solúvel, e para todas as concentrações de P-Orgânico Suspenso. A não eficiência ocorreu pela aproximação ou superioridade das concentrações finais em relação as concentrações iniciais não permitindo a possibilidades de cálculo. Marguti et al. (2008) obtiveram eficiências para a forma solúvel do P-Orgânico entre 80% e 95% para o tratamento aplicado a efluentes sanitários brutos e eficiências máximas de 40% para o tratamento de efluentes sanitários finais.

As eficiências obtidas com o uso do coagulante cloreto férrico, para as diferentes frações de fósforo presentes no efluente sanitário em estudo, podem ser explicadas pelas reações que ocorrem com a adição de sais inorgânicos ao efluente. Estes tendem a converter as formas de ortofosfatos solúveis em precipitados insolúveis, que por gravidade tendem a sedimentar no fundo do reator. As reações para as formas de polifosfatos e fósforo na forma orgânica com o uso de sais inorgânicos ocorrem de forma mais complexa, existindo a possibilidade de haver adsorção destas formas aos flocos formados após a etapa de coagulação.

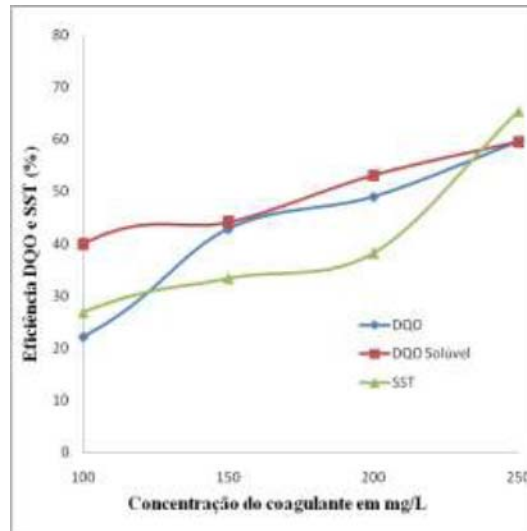


Figura 26: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto férrico.

As eficiências médias calculadas para a análise de DQO solúvel foram superiores às eficiências médias das análises de DQO e SST. Esse fato pode ser explicado pela maior parte da DQO presente no efluente em estudo estar na forma solúvel. Observa-se que para todas as análises da Figura 26, apesar do comportamento das curvas não serem similares, todas tem comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. As eficiências médias variaram em todas as concentrações utilizadas para este coagulante de 22% a 60% para a DQO, 40% a 60% para a DQO solúvel e 27% a 65% para os SST.

Sinelli et al. (2002) descrevem a partir de resultados experimentais com o uso do coagulante cloreto férrico, em concentrações que variaram de 40 mg/L a 225 mg/L, eficiências para a análise de DQO entre 20% a 74%. Para a análise de SST as eficiências estiveram entre 18% a 95% (SINELLI et al., 2002).

4.3.1.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Cloreto Férrico

O detalhamento para o Teste Tukey's foi realizado a partir das médias das eficiências calculadas do tratamento físico-químico com o uso do coagulante cloreto férrico e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L). As Tabelas 05 a 09 mostram o resumo estatístico para as diferentes análises.

Tabela 05: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (FeCl₃).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Total	100	33,03	a
P-Total	150	52,87	b
P-Total	200	65,38	c
P-Total	250	80,64	d
P-Total Solúvel	100	31,45	a
P-Total Solúvel	150	54,77	b
P-Total Solúvel	200	65,60	c
P-Total Solúvel	250	81,83	d
P-Total Suspenso	100	50,73	a
P-Total Suspenso	150	31,62	b
P-Total Suspenso	200	62,86	c
P-Total Suspenso	250	67,27	c

A análise estatística teste tukey's realizada para o coagulante cloreto férrico (Tabela 05) mostra diferença significativa para todas as concentrações utilizadas para as análises de P-Total e P-Total Solúvel. Para o P-Total na forma particulada a diferença significativa foi para as concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L do coagulante, as demais concentrações mostraram similaridade nas eficiências de remoções.

Tabela 06: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (FeCl₃).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Ortofosfato	100	46,40	a
Ortofosfato	150	54,41	b
Ortofosfato	200	63,78	c
Ortofosfato	250	74,78	d
Ortofosfato Solúvel	100	40,86	a
Ortofosfato Solúvel	150	51,65	b
Ortofosfato Solúvel	200	63,22	c
Ortofosfato Solúvel	250	74,47	d
Ortofosfato Suspenso	100	93,88	a
Ortofosfato Suspenso	150	78,06	b
Ortofosfato Suspenso	200	68,61	c
Ortofosfato Suspenso	250	77,50	b

A Tabela 06 referente às frações de ortofosfatos traz o resumo do teste tukey's, pode-se observar que todas as concentrações tiveram diferença significativa a partir das médias das eficiências calculadas.

Tabela 07: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (FeCl₃).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Polifosfato	100	34,87	a
Polifosfato	150	53,90	b
Polifosfato	200	72,05	c
Polifosfato	250	93,04	d
Polifosfato Solúvel	100	31,91	a
Polifosfato Solúvel	150	54,34	b
Polifosfato Solúvel	200	72,02	c
Polifosfato Solúvel	250	93,36	d
Polifosfato Suspenso	100	78,88	a
Polifosfato Suspenso	150	47,41	b
Polifosfato Suspenso	200	72,41	a
Polifosfato Suspenso	250	88,36	c

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de polifosfatos (Tabela 07) mostra que para todas as formas fracionadas houve diferença significativa entre as concentrações utilizadas do coagulante. Apenas nas concentrações de 100 mg/L e 200 mg/L para a forma particulada dos polifosfatos houve similaridade estatística nas eficiências de remoções.

Tabela 08: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico (FeCl₃).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Orgânico	100	*	-
P-Orgânico	150	42,65	a
P-Orgânico	200	58,12	b
P-Orgânico	250	83,32	c
P-Orgânico Solúvel	100	*	-
P-Orgânico Solúvel	150	76,13	a
P-Orgânico Solúvel	200	63,15	b
P-Orgânico Solúvel	250	93,66	c
P-Orgânico Suspenso	100	*	-
P-Orgânico Suspenso	150	*	-
P-Orgânico Suspenso	200	*	-
P-Orgânico Suspenso	250	*	-

*Não houve eficiência calculada.

As formas de P-Orgânico e P-Orgânico Solúvel (Tabela 08) mostraram diferença significativa entre as concentrações de 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L. Para a forma particulada do P-Orgânico não houveram eficiências calculadas.

Tabela 09: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (FeCl_3).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
DQO	100	22,16	a
DQO	150	42,84	b
DQO	200	49,01	b
DQO	250	59,51	c
DQO Solúvel	100	39,86	a
DQO Solúvel	150	44,06	ab
DQO Solúvel	200	53,10	b
DQO Solúvel	250	59,56	b
SST	100	26,83	a
SST	150	33,33	b
SST	200	38,21	b
SST	250	65,45	c

A Tabela 09 mostra que a DQO teve diferença significativa para a maior parte das concentrações do coagulante, tendo similaridade apenas nas concentrações de 150 mg/L e 200 mg/L. A DQO Solúvel diferiu estatisticamente entre a menor concentração e as maiores concentrações do coagulante. Para os SST a diferença significativa foi para a menor concentração e para a maior concentração, sendo similares entre si as concentrações de 150 mg/L e 200 mg/L.

A análise estatística Teste Tukey's mostrou diferenças significativas para a maior parte das análises entre as médias calculadas para as diferentes concentrações do coagulante cloreto férrico. Esse fato indica que o aumento das concentrações do coagulante esteve relacionado diretamente aos maiores índices de remoções observados estatisticamente pelas diferenças significativas.

4.3.2 Eficiência de remoção para o Sulfato de Alumínio

As eficiências das remoções para as análises de DQO, SST e diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) encontram-se nas Figuras 27 e 28.

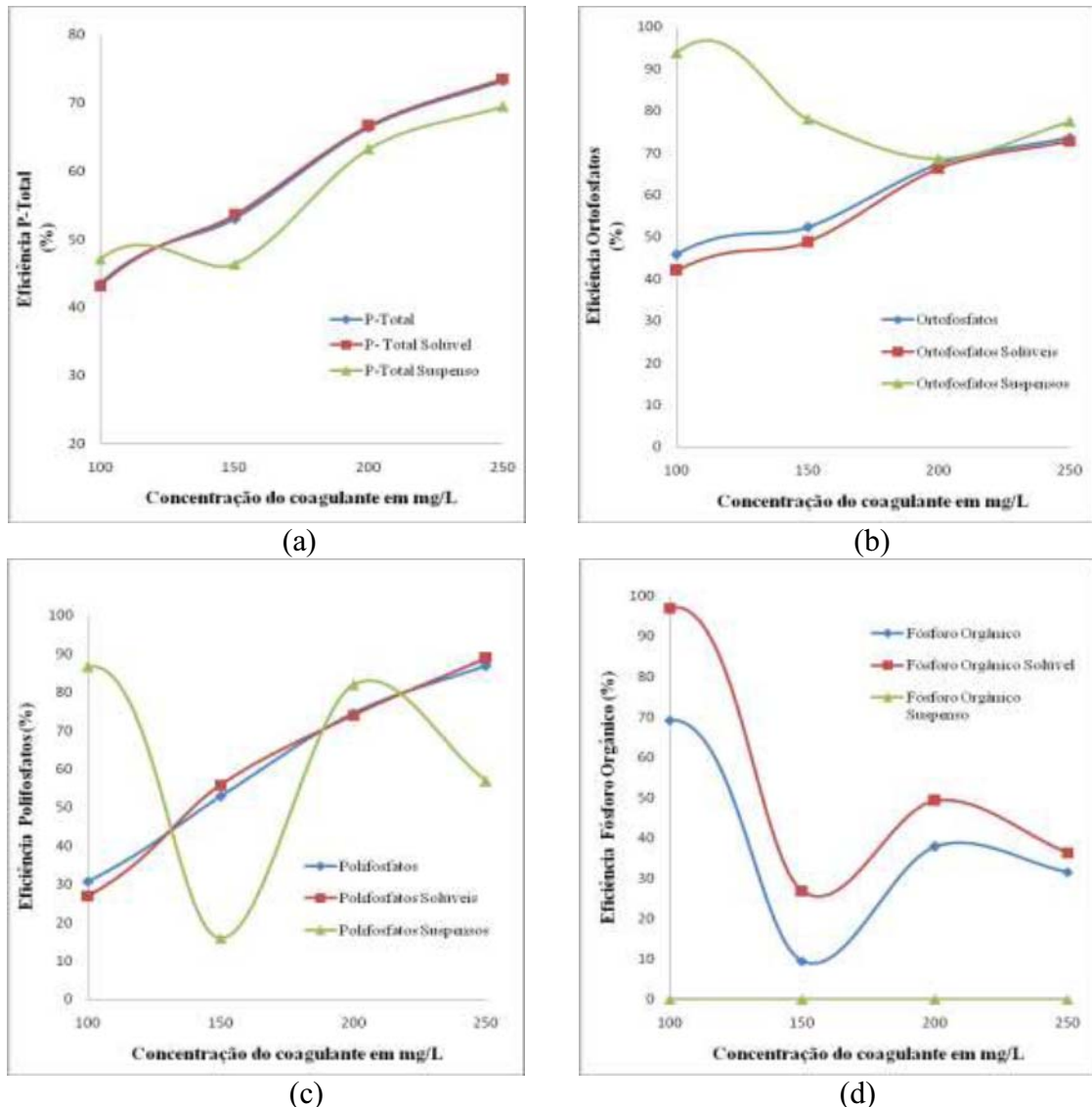


Figura 27: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio: (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspense; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspense; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspense; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspense.

Para o P-Total e o P-Total Solúvel (Figura 27(a)) houve similaridade no comportamento das curvas, remoções próximas em todas as concentrações causaram sobreposição aparente para ambas as curvas no gráfico. A ascendência foi predominante para as remoções indicando maiores remoções à medida que aumenta a concentração do coagulante. As eficiências para o P-Total e o P-Total Solúvel variaram de 43% a 74% para todas as concentrações do coagulante. A eficiência para o P-Total Suspense foi menor em comparação ao P-Total e ao P-Total Solúvel para a maior parte das concentrações do agente coagulante. Houve uma oscilação na curva do P-Total Suspense na concentração de 100 mg/L, que mostra uma eficiência superior ao P-Total e ao P-Total Solúvel na mesma

faixa de concentração do coagulante. Apesar da oscilação, o P-Total Suspenso também teve comportamento ascendente para a curva do gráfico à medida que a concentração do coagulante aumentou. A eficiência de remoção para o P-Total Suspenso variou de 47% a 69%. A partir das médias calculadas para todas as concentrações do agente coagulante foi possível observar que os maiores índices de remoções foram para o P-Total e para o P-Total Solúvel, as menores remoções foram para a forma particulada do P-Total.

A Figura 27(b) mostra as eficiências para as análises de ortofosfatos, ortofosfatos solúveis e ortofosfatos suspensos. Observa-se que as curvas dos ortofosfatos e ortofosfatos solúveis possuem similaridade no comportamento, ambas tendem a crescer à medida que ocorre o aumento da concentração do coagulante. Semelhanças na porcentagem de remoção na concentração de 200 mg/L do reagente para ambas as análises causaram aparente sobreposição nas curvas de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis. As eficiências para os ortofosfatos e os ortofosfatos solúveis variaram de 42% a 74%. Para os ortofosfatos particulados as eficiências estiveram entre 78% e 83%. O cálculo das médias para as eficiências dos ortofosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de ortofosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de ortofosfatos presentes no efluente em estudo.

As eficiências para os polifosfatos, polifosfatos solúveis e polifosfatos suspensos estão discriminadas na Figura 27(c). Houve semelhança de comportamento entre as curvas de polifosfatos e polifosfatos solúveis, ambas mostram comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. A aproximação de valores de eficiência na concentração de 200 mg/L causou aparente sobreposição das curvas. As eficiências para os polifosfatos e os polifosfatos solúveis foram de 27% a 89%. Para os polifosfatos suspensos a menor remoção foi de 16% e a maior de 87%. A partir das médias calculadas para todas as concentrações do coagulante, foi possível observar que o maior índice de remoção entre as formas fracionadas dos polifosfatos foi para a forma solúvel.

Na Figura 27(d) encontram-se as eficiências para o fósforo orgânico, fósforo orgânico solúvel e fósforo orgânico suspenso. A análise da curva para o fósforo orgânico e o fósforo orgânico solúvel, mostra similaridade de comportamento entre as curvas. As eficiências variaram de 9% a 69% para o fósforo orgânico e 27% a 97% para o fósforo orgânico solúvel. Para ambas as análises não houve ascendência no comportamento das curvas à medida que ocorreu o aumento da concentração do coagulante, devido às oscilações nos valores de

remoções encontrados. Não foi obtido valores de eficiência para a análise de fósforo orgânico suspenso, pois as concentrações finais se aproximaram ou foram superiores as concentrações inicial não permitindo possibilidades de cálculo. O maior índice de remoção, a partir do cálculo das médias, foi para a forma solúvel.

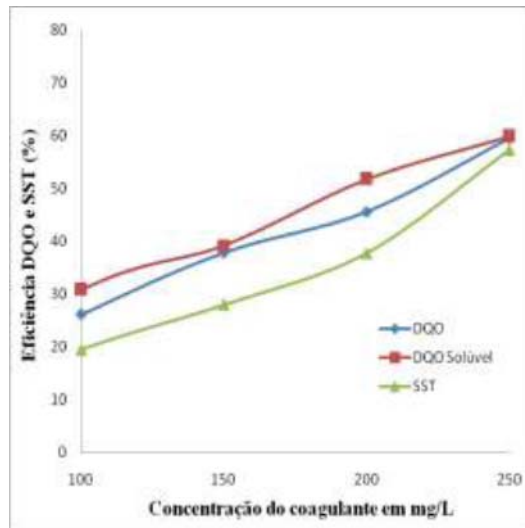


Figura 28: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do sulfato de alumínio.

A análise de DQO solúvel teve eficiências superiores às análises de DQO e SST, aproximando-se apenas da análise de DQO nas concentrações de 150 mg/L e 250 mg/L. Esse fato pode ser explicado pela maior parte da DQO presente no efluente em estudo, estar na forma solúvel. É possível observa-se que para todas as análises da Figura 28, há um comportamento similar, onde as curvas tender a crescer em relação ao aumento da concentração do coagulante. As eficiências calculadas para todas as concentrações utilizadas para este reagente variaram de 26% a 60% para a DQO, 31% a 60% para a DQO solúvel e 20% a 57% para os SST.

4.3.2.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Sulfato de Alumínio

O detalhamento para o Teste Tukey's foi realizado a partir das médias das eficiências calculadas do tratamento físico-químico com o uso do coagulante sulfato de alumínio e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L). As Tabelas 10 a 14 mostram o resumo estatístico para as diferentes análises.

Tabela 10: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total ($Al_2(SO_4)_3$).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Total	100	43,46	a
P-Total	150	52,93	b
P-Total	200	66,34	c
P-Total	250	73,21	d
P-Total Solúvel	100	43,14	a
P-Total Solúvel	150	53,52	b
P-Total Solúvel	200	66,61	c
P-Total Solúvel	250	73,54	d
P-Total Suspenso	100	46,32	a
P-Total Suspenso	150	47,06	a
P-Total Suspenso	200	63,23	b
P-Total Suspenso	250	69,48	b

O resumo estatístico teste tukey's da Tabela 10 para o coagulante sulfato de alumínio mostra que houve diferença significativa para todas as concentrações utilizadas para as análises de P-Total e P-Total Solúvel. Para a forma particulada do P-Total houve similaridade entre as menores concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L e as para as maiores concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante, a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações.

Tabela 11: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos ($Al_2(SO_4)_3$).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Ortofosfato	100	45,84	a
Ortofosfato	150	52,32	a
Ortofosfato	200	67,30	b
Ortofosfato	250	73,62	b
Ortofosfato Solúvel	100	42,06	a
Ortofosfato Solúvel	150	48,77	a
Ortofosfato Solúvel	200	66,30	b
Ortofosfato Solúvel	250	72,78	b
Ortofosfato Suspenso	100	82,77	a
Ortofosfato Suspenso	150	80,83	a
Ortofosfato Suspenso	200	78,33	a
Ortofosfato Suspenso	250	75,83	a

A Tabela 11 referente às frações de ortofosfatos traz o resumo do teste tukey's. Pode-se verificar que para os ortofosfatos e os ortofosfatos solúveis houve similaridade entre as menores concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L e as para as maiores concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante, a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações. Não houve diferença significativa para a forma particulada de ortofosfatos.

Tabela 12: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos ($Al_2(SO_4)_3$).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Polifosfato	100	30,72	a
Polifosfato	150	52,93	a
Polifosfato	200	74,52	b
Polifosfato	250	86,85	c
Polifosfato Solúvel	100	26,96	a
Polifosfato Solúvel	150	55,82	b
Polifosfato Solúvel	200	74,02	c
Polifosfato Solúvel	250	88,87	c
Polifosfato Suspenso	100	15,94	a
Polifosfato Suspenso	150	56,89	b
Polifosfato Suspenso	200	81,89	c
Polifosfato Suspenso	250	86,64	c

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de polifosfatos (Tabela 12) mostra que para a forma de polifosfato houve similaridade entre as menores concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L, a diferença significativa ocorreu para o grupo de menores concentrações e para as concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante. As formas solúvel e particulada apresentaram diferença significativa entre as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e para o grupo de concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante que apresentaram semelhança estatística entre si.

Tabela 13: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico ($Al_2(SO_4)_3$).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Orgânico	100	69,15	a
P-Orgânico	150	9,44	b
P-Orgânico	200	37,83	c
P-Orgânico	250	31,54	c
P-Orgânico Solúvel	100	96,98	a
P-Orgânico Solúvel	150	26,92	b
P-Orgânico Solúvel	200	49,26	c
P-Orgânico Solúvel	250	36,39	d
P-Orgânico Suspenso	100	*	-
P-Orgânico Suspenso	150	*	-
P-Orgânico Suspenso	200	*	-
P-Orgânico Suspenso	250	*	-

*Não houve eficiência calculada.

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de P-Orgânico (Tabela 13) mostra que para o P-Orgânico houve diferença significativa entre as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e para o grupo de concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante que apresentaram semelhança estatística entre si. Para o P-Orgânico na forma solúvel a

diferença significativa ocorreu para todas as concentrações do coagulante. Não houve eficiência calculada para a forma particulada.

Tabela 14: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
DQO	100	26,18	a
DQO	150	37,90	a
DQO	200	45,62	b
DQO	250	59,51	b
DQO Solúvel	100	30,82	a
DQO Solúvel	150	39,21	a
DQO Solúvel	200	51,81	b
DQO Solúvel	250	59,88	b
SST	100	19,51	a
SST	150	28,05	b
SST	200	37,80	c
SST	250	57,32	d

A Tabela 14 mostra que as análises de DQO e DQO solúvel mostraram diferenças significativas entre os grupos de menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) e os de maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L) do coagulante. Para os SST a diferença significativa observada ocorreu para todas as concentrações do coagulante.

A análise estatística Teste Tukey's para o sulfato de alumínio mostrou que as diferenças significativas para a maior parte das análises esteve relacionada a dois grupos, o grupo das menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) versus o grupo de maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L). Esse fato indica que as maiores concentrações do coagulante (200 mg/L e 250 mg/L) obtiveram em média as maiores eficiências de remoções, distanciando-se estatisticamente do grupo de menor concentração.

4.3.3 Eficiência de remoção para o Óxido de Cálcio

As eficiências das remoções para nas análises de DQO, SST e as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante óxido de cálcio (CaO) encontram-se nas Figuras 29 e 30.

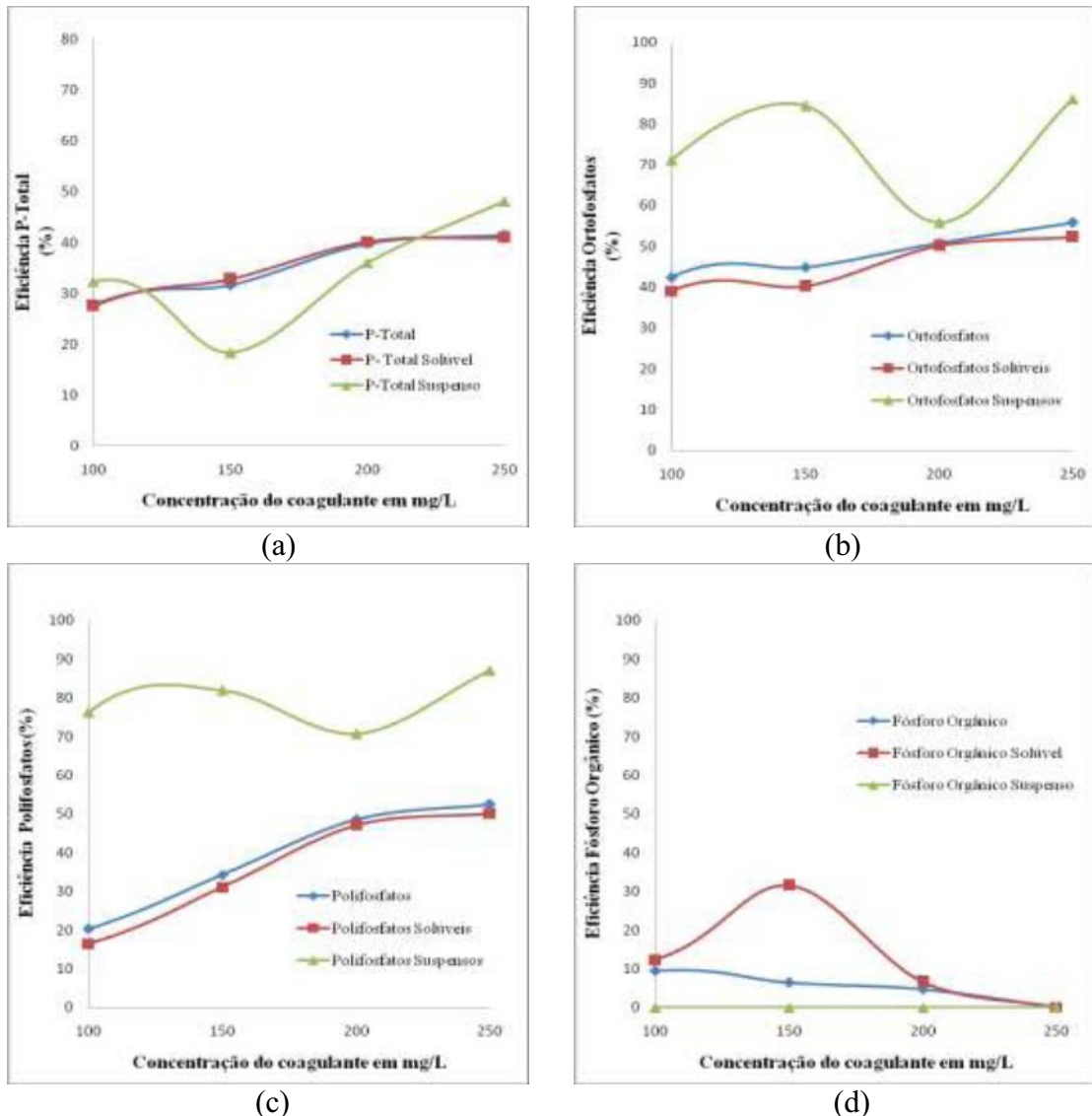


Figura 29: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio: (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspenso; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspenso; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspenso; (d) Fósforo Orgânico, Fósforo Orgânico Solúvel e Fósforo Orgânico Suspenso

Para o P-Total e o P-Total Solúvel (Figura 29(a)) houve similaridade no comportamento das curvas, remoções próximas nas concentrações do coagulante de 100 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L nas duas análises, causaram aparente sobreposição das curvas do gráfico. Para ambas as análises a ascendência nas curvas foi predominante indicando maiores remoções à medida que aumenta a concentração do agente coagulante. As eficiências para o P-Total e P-Total Solúvel variaram de 28% a 42% para todas as concentrações do coagulante. Apesar da oscilação ocorrida na concentração de 150 mg/L, o P-Total Suspenso teve comportamento ascendente à medida que a concentração do coagulante aumenta. As eficiências de remoções para o P-Total Suspenso variaram de 32% a 48%. A partir das médias

calculadas para todas as concentrações do coagulante, foi possível observar que o maior índice de remoção entre as formas fracionadas do P-Total foi para a forma solúvel.

A Figura 29(b) traz as eficiências para as análises de ortofosfatos, ortofosfatos solúveis e ortofosfatos suspensos. Observa-se que as curvas dos ortofosfatos e ortofosfatos solúveis são similares e tendem ao comportamento ascendente à medida que ocorre o aumento da concentração do agente coagulante. Semelhanças na porcentagem de remoção na concentração de 200 mg/L para ambas as análises causaram aparente sobreposição das curvas de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis. As eficiências para os ortofosfatos e para os ortofosfatos na forma solúvel estiveram entre o mínimo de 39% e o máximo de 56%. Para os ortofosfatos na forma particulada houve aproximação de comportamento da curva em relação aos ortofosfatos e ortofosfatos solúveis na concentração de 200 mg/L. As eficiências variaram de 56% a 86%. O cálculo das médias para as eficiências dos ortofosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de ortofosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de ortofosfatos presentes no efluente.

As eficiências para os polifosfatos e polifosfatos solúveis (Figura 29(c)) mostram semelhança de comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. As variações das eficiências de polifosfatos e polifosfatos solúveis foram de 17% a 52%. A eficiência para os polifosfatos suspensos variaram de 71% a 87%. O cálculo das médias para as eficiências dos polifosfatos particulados mostraram maiores índices de remoções, porém esta forma representou a menor fração, menores concentrações, entre as três formas de polifosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante entre as concentrações de polifosfatos presentes no efluente.

Na Figura 29(d) estão as eficiências para o P-Orgânico, P-Orgânico Solúvel e P-Orgânico Suspenso. A análise das curvas de P-Orgânico e o P-Orgânico Solúvel, mostra diferença de comportamento entre ambas as análises, as maiores remoções observadas foram para o P-Orgânico Solúvel. Não foram obtidos valores de eficiência para as análises de fósforo orgânico e fósforo orgânico solúvel na concentração de 250 mg/L, uma vez que as concentrações finais aproximaram-se ou foram superiores as concentrações iniciais não permitindo possibilidades de cálculo. As eficiências médias variaram de 5% a 9% para o P-Orgânico e 6% a 31% para o P-Orgânico Solúvel. Ambas as análises não apresentaram comportamento de ascendência em relação ao aumento da concentração do coagulante,

devido às oscilações nos valores de remoções encontrados. Não foram obtidos valores de eficiências para a análise de P-Orgânico Suspensão, pois as concentrações finais aproximaram-se ou foram superiores as concentrações iniciais não permitindo possibilidades de cálculo.

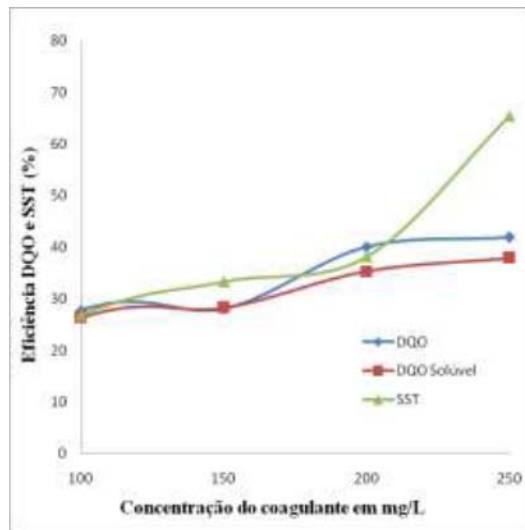


Figura 30: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do óxido de cálcio.

As eficiências para as análises de DQO, DQO solúvel e SST são apresentadas na Figura 30. A análise de DQO teve eficiências superiores à análise de DQO solúvel nas concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L. Aproximações de eficiências foram observadas nas concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L, o que causou aparente sobreposição entre as curvas de DQO e DQO solúvel. Observou-se em todas as análises da Figura 30 que as curvas tenderam a ascensão com o aumento da concentração do agente coagulante. As eficiências variaram de 28% a 42% para a DQO, 26% a 38% para a DQO solúvel e 16% a 41% para os SST. O cálculo das médias das remoções indicou maior índice de remoção para análise de DQO.

4.3.3.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Óxido de Cálcio

O detalhamento para o Teste Tukey's foi realizado a partir das médias das eficiências calculadas do tratamento físico-químico com o uso do coagulante óxido de cálcio e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L). As Tabelas 15 a 19 mostram o resumo estatístico para as diferentes análises.

Tabela 15: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (CaO).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Total	100	27,81	a
P-Total	150	31,62	a
P-Total	200	39,83	b
P-Total	250	41,51	b
P-Total Solúvel	100	27,54	a
P-Total Solúvel	150	32,79	a
P-Total Solúvel	200	40,17	b
P-Total Solúvel	250	40,92	b
P-Total Suspenso	100	32,35	a
P-Total Suspenso	150	18,38	b
P-Total Suspenso	200	36,03	a
P-Total Suspenso	250	48,16	c

A Tabela 15 mostra para o P-Total e o P-Total na sua forma solúvel que houve similaridade entre as menores concentrações do coagulante (100 mg/L e 150 mg/L) e entre as maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L), a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações. Para a forma particulada do P-Total houve diferença significativa entre as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e 250 mg/L utilizadas do coagulante e similaridade entre as concentrações de 100 mg/L e 200 mg/L.

Tabela 16: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (CaO).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Ortofosfato	100	42,39	a
Ortofosfato	150	44,86	a
Ortofosfato	200	50,78	b
Ortofosfato	250	55,86	b
Ortofosfato Solúvel	100	39,04	a
Ortofosfato Solúvel	150	40,25	a
Ortofosfato Solúvel	200	50,19	b
Ortofosfato Solúvel	250	52,33	b
Ortofosfato Suspenso	100	71,11	a
Ortofosfato Suspenso	150	84,44	b
Ortofosfato Suspenso	200	55,83	c
Ortofosfato Suspenso	250	86,11	b

A Tabela 16 referente às frações de ortofosfatos traz o resumo estatístico do teste tukey's, pode-se verificar que para os ortofosfatos e os ortofosfatos solúveis há similaridade entre as menores concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L entre as maiores concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante, a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações. A diferença significativa para a forma particulada de ortofosfatos

ocorreu para as concentrações de 100 mg/L e 200 mg/L, as concentrações de 150 mg/L e 250 mg/L foram similares entre si e diferiram-se estatisticamente da demais.

Tabela 17: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos(CaO).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Polifosfato	100	20,27	a
Polifosfato	150	34,27	b
Polifosfato	200	48,62	c
Polifosfato	250	52,49	c
Polifosfato Solúvel	100	16,51	a
Polifosfato Solúvel	150	31,07	b
Polifosfato Solúvel	200	47,13	c
Polifosfato Solúvel	250	50,17	c
Polifosfato Suspenso	100	76,29	ab
Polifosfato Suspenso	150	81,89	a
Polifosfato Suspenso	200	70,69	b
Polifosfato Suspenso	250	87,07	a

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de polifosfatos (Tabela 17) mostra que para as formas de polifosfato e polifosfato na forma solúvel a diferença significativa ocorreu para as concentrações do coagulante de 100 mg/L, 150 mg/L e para o grupo de 200 mg/L e 250 mg/L, que mostraram semelhanças estatísticas entre si. Os polifosfatos na forma particulada apresentaram diferença significativa para a concentração 200 mg/L, as demais concentrações não apresentaram diferença significativa entre si.

Tabela 18: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Orgânico (CaO).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Orgânico	100	9,50	a
P-Orgânico	150	6,45	a
P-Orgânico	200	4,65	a
P-Orgânico	250	*	-
P-Orgânico Solúvel	100	12,37	a
P-Orgânico Solúvel	150	31,55	b
P-Orgânico Solúvel	200	6,62	c
P-Orgânico Solúvel	250	*	-
P-Orgânico Suspenso	100	*	-
P-Orgânico Suspenso	150	*	-
P-Orgânico Suspenso	200	*	-
P-Orgânico Suspenso	250	*	-

*Não houve eficiência calculada.

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de P-Orgânico (Tabela 18) mostra que não houve diferença significativa entre as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e 200 mg/L para o P-Orgânico. A diferença significativa observada foi para a forma solúvel nas

concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e 200 mg/L. Não houve eficiência calculada para a forma particulada e para as concentrações de 250 mg/L para as demais frações do P-Orgânico.

Tabela 19: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (CaO).

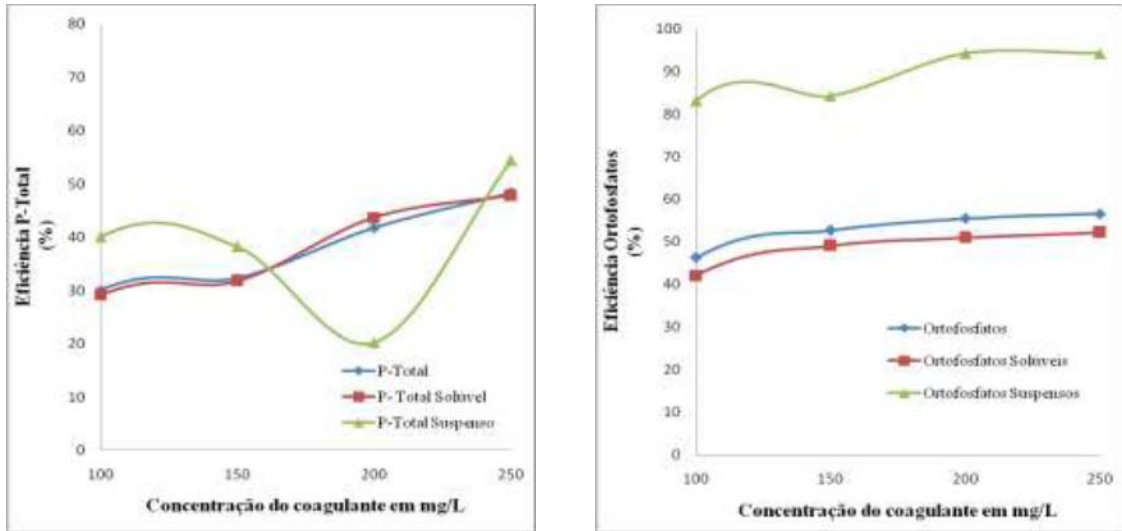
Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
DQO	100	27,72	a
DQO	150	28,02	a
DQO	200	40,06	b
DQO	250	41,92	b
DQO Solúvel	100	26,29	a
DQO Solúvel	150	28,23	a
DQO Solúvel	200	35,33	b
DQO Solúvel	250	37,92	b
SST	100	16,26	a
SST	150	19,10	a
SST	200	28,45	c
SST	250	41,46	d

A Tabela 19 mostra que para as análises de DQO e DQO solúvel houve diferenças significativas entre os grupos de menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) e os de maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L) do coagulante. Para os SST a diferença significativa observada ocorreu para as maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L) do coagulante, as menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) apresentaram semelhança estatística entre si.

A análise estatística Teste Tukey's para o óxido de cálcio mostrou que as diferenças significativas para a maior parte das análises esteve relacionada a dois grupos, o grupo das menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) versus o grupo de maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L). Esse fato indica que as maiores concentrações do coagulante (200 mg/L e 250 mg/L) obtiveram em média as maiores eficiências de remoções, distanciando-se estatisticamente do grupo de menor concentração.

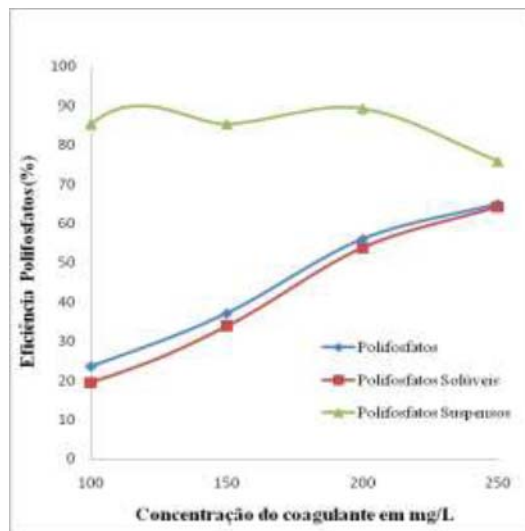
4.3.4 Eficiência de remoção para o Cloreto de Cálcio

As eficiências das remoções para as análises de DQO, SST e diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto de cálcio (CaCl_2) encontram-se nas Figuras 31 e 32.



(a)

(b)



(c)

Figura 31: Eficiências calculadas para análises das diferentes formas de fósforo após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio: (a) P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspenso; (b) Ortofosfatos, Ortofosfatos Solúveis e Ortofosfatos Suspensos; (c) Polifosfatos, Polifosfatos Solúveis e Polifosfatos Suspensos.

As análises de P-Total, P-Total Solúvel e P-Total Suspenso são apresentados na Figura 31(a). Para o P-Total e o P-Total Solúvel houve similaridade no comportamento das curvas. Remoções próximas nas concentrações do reagente de 100 mg/L, 150 mg/L e 250 mg/L nas duas análises, ocasionaram aparente sobreposição das curvas do gráfico. Para ambas as análises a ascendência nas curvas foi predominante indicando maiores remoções à medida que houve o aumento da concentração do coagulante. As eficiências para o P-Total e P-Total Solúvel variaram de 29% a 48% para todas as concentrações do coagulante. Para o P-Total na forma particulada as eficiências estiveram entre 20% e 54%. Apesar de oscilações na curva, o P-Total Suspenso teve comportamento ascendente à medida que a concentração do coagulante

aumentou, salvo na concentração de 200 mg/L que teve uma baixa eficiência em relação às demais. As maiores remoções foram para a forma solúvel que esteve presente em maiores concentrações no efluente.

A Figura 31(b) traz as eficiências de remoções para as análises de ortofosfatos, ortofosfatos solúveis e ortofosfatos suspensos. Observa-se que as curvas dos ortofosfatos e ortofosfatos solúveis foram similares, tendem ao comportamento ascendente à medida que ocorre o aumento da concentração do coagulante. As eficiências para os ortofosfatos e para os ortofosfatos solúveis variaram entre 42% e 57%. Os ortofosfatos suspensos tiveram comportamento da curva ascendente com o aumento da concentração do coagulante e as eficiências variaram de 83% a 94%. O cálculo das médias para as eficiências dos ortofosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de ortofosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de ortofosfatos presentes no efluente em estudo.

As eficiências para os polifosfatos, polifosfatos solúveis e polifosfatos suspensos estão discriminadas na Figura 31(c). Houve semelhança de comportamento entre as curvas de polifosfatos e polifosfatos solúveis, apenas uma aparente sobreposição na concentração de 250 mg/L do coagulante, ambas mostraram comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. As eficiências para os polifosfatos e para os polifosfatos na forma solúvel estiveram entre 19% e 65%. A eficiência para os polifosfatos suspensos variaram de 76% a 89%. O cálculo das médias para as eficiências dos polifosfatos particulados mostraram maiores índices, porém esta forma representou a menor fração ou seja as menores concentrações obtidas entre as três formas de polifosfatos. A partir disso, pode-se concluir que as maiores remoções foram para a forma solúvel, uma vez que, esta forma foi representante das maiores concentrações de polifosfatos presentes no efluente em estudo.

Não houve registro das eficiências para o fósforo orgânico, fósforo orgânico solúvel e fósforo orgânico suspenso. Para todas as concentrações do coagulante destas formas de P-Orgânico, as concentrações finais foram semelhantes ou superiores as concentrações iniciais, não permitindo a possibilidades de cálculo para possíveis eficiências.

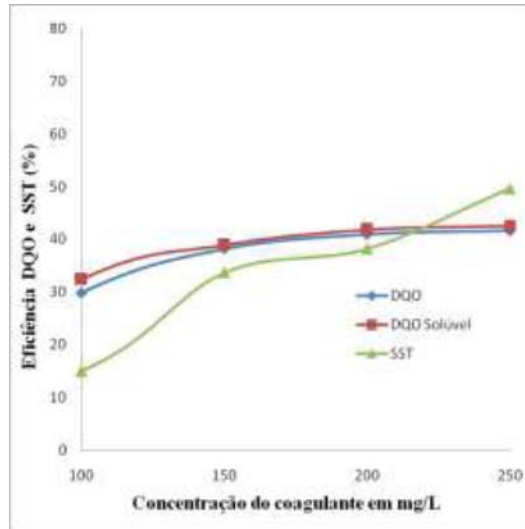


Figura 32: Eficiência calculada para a análise de DQO, DQO solúvel e SST após o tratamento físico-químico com o uso do cloreto de cálcio.

As eficiências médias para a análise de DQO solúvel foram superiores às eficiências médias das análises de DQO e SST (Figura 32), salvo na concentração de 250 mg/L, onde os SST teve maior remoção. Esse fato pode ser explicado pela maior parte da DQO presente no efluente em estudo, estar na forma solúvel. Observa-se que para todas as análises da Figura 32, apesar da similaridade de comportamento ser apenas para as curvas de DQO e DQO solúvel, todas tem comportamento ascendente em relação ao aumento da concentração do coagulante. As eficiências médias variaram em todas as concentrações utilizadas para este coagulante de 29% a 42% para a DQO, 15% a 50% para a DQO na forma solúvel e entre 15% e 50% para os SST.

4.3.4.1 Análise Estatística: Teste Tukey's para o Cloreto de Cálcio

O detalhamento para o Teste Tukey's foi realizado a partir das médias das eficiências calculadas do tratamento físico-químico com o uso do coagulante cloreto de cálcio e suas diferentes concentrações (100 mg/L, 150 mg/L, 200 mg/L e 250 mg/L). As Tabelas 20 a 23 trazem o resumo estatístico para as diferentes análises

Tabela 20: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de P-Total (CaCl₂).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
P-Total	100	30,06	a
P-Total	150	32,28	a
P-Total	200	41,78	b
P-Total	250	48,35	b
P-Total Solúvel	100	29,17	a
P-Total Solúvel	150	31,75	a
P-Total Solúvel	200	43,69	b
P-Total Solúvel	250	47,81	b
P-Total Suspenso	100	40,07	a
P-Total Suspenso	150	38,23	a
P-Total Suspenso	200	20,22	b
P-Total Suspenso	250	54,41	c

A Tabela 20 mostra que para o P-Total e o P-Total na forma solúvel houve similaridade entre as menores concentrações do coagulante (100 mg/L e 150 mg/L) e entre as maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L), a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações. O P-Total na forma suspensa apresentou diferença significativa para as concentrações de 200 mg/L, 250 mg/L e para o grupo de menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L).

Tabela 21: Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Ortofosfatos (CaCl₂).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Ortofosfato	100	46,34	a
Ortofosfato	150	52,73	b
Ortofosfato	200	55,48	b
Ortofosfato	250	56,56	b
Ortofosfato Solúvel	100	42,06	a
Ortofosfato Solúvel	150	49,06	b
Ortofosfato Solúvel	200	50,97	b
Ortofosfato Solúvel	250	52,17	b
Ortofosfato Suspenso	100	83,06	a
Ortofosfato Suspenso	150	84,17	a
Ortofosfato Suspenso	200	94,16	b
Ortofosfato Suspenso	250	94,17	b

A Tabela 21 mostra que os ortofosfatos e os ortofosfatos solúveis tiveram comportamento estatístico semelhante, em ambas as frações a diferença significativa ocorreu para a menor concentração de 100 mg/L versus o grupo das demais concentrações que mostraram similaridade estatística entre si. A forma particulada mostrou similaridade entre as

menores concentrações do coagulante (100 mg/L e 150 mg/L) e entre as maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L), a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações.

Tabela 22 :Resumo Anova Teste Tukey's para análise de Polifosfatos (CaCl₂).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
Polifosfato	100	23,61	a
Polifosfato	150	37,06	b
Polifosfato	200	55,97	c
Polifosfato	250	64,99	d
Polifosfato Solúvel	100	19,46	a
Polifosfato Solúvel	150	33,82	b
Polifosfato Solúvel	200	53,73	c
Polifosfato Solúvel	250	64,27	d
Polifosfato Suspenso	100	85,34	a
Polifosfato Suspenso	150	85,35	a
Polifosfato Suspenso	200	89,22	a
Polifosfato Suspenso	250	75,86	b

A análise estatística a partir das eficiências para as frações de polifosfatos (Tabela 22) mostra que para as formas de polifosfatos e polifosfatos solúveis a diferença significativa ocorreu para todas as concentrações do coagulante. A forma particulada dos polifosfatos mostrou semelhança estatística entre as concentrações de 100 mg/L, 150 mg/L e 200 mg/L, a diferença significativa ocorreu entre o grupo de semelhança e a concentração de 250 mg/L.

Para as formas de P-Orgânico não houveram eficiências calculadas não sendo possível a análise estatística destas.

Tabela 23: Resumo Anova Teste Tukey's para análises de DQO e SST (CaCl₂).

Análise	Concentração coagulante (mg/L)	Média remoção de P (%)	Intervalos de não-significância
DQO	100	29,88	a
DQO	150	38,21	a
DQO	200	40,99	a
DQO	250	41,61	c
DQO Solúvel	100	32,43	a
DQO Solúvel	150	38,43	ab
DQO Solúvel	200	41,79	b
DQO Solúvel	250	42,44	b
SST	100	15,04	a
SST	150	33,73	b
SST	200	38,21	b
SST	250	49,59	c

A Tabela 23 mostra que a análise de DQO teve diferença significativa entre o grupo de concentrações 100 mg/L, 150 mg/L e 200 mg/L versus a concentração de 250 mg/L. A análise estatística para a DQO em sua forma solúvel mostra que houve similaridade entre as menores concentrações de 100 mg/L e 150 mg/L e as para as maiores concentrações de 200 mg/L e 250 mg/L do coagulante, a diferença significativa ocorreu apenas entre os dois grupos de concentrações, havendo exceção para a concentração de 150 mg/L que se assemelhou aos dois grupos. Os SST tiveram diferença significativa para as concentrações de 100 mg/L e 250 mg/L e para o grupo de concentrações de 150 mg/L e 200 mg/L que se assemelharam estatisticamente.

A análise estatística Teste Tukey's para o cloreto de cálcio mostrou que as diferenças significativas para a maior parte das análises esteve relacionada a dois grupos, o grupo das menores concentrações (100 mg/L e 150 mg/L) versus o grupo de maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L). Esse fato indica que as maiores concentrações do coagulante (200 mg/L e 250 mg/L) obtiveram em média as maiores eficiências de remoções, distanciando-se estatisticamente do grupo de menor concentração.

5 CONCLUSÃO

Após o término desta pesquisa pode-se concluir que:

- a) A maior parte do fósforo presente no efluente de estudo encontra-se na forma de ortofosfatos e suas diferentes frações, e a menor parcela na forma de fósforo orgânico e suas diferentes frações;
- b) Para todas as frações das diferentes formas do fósforo a forma solúvel foi predominante;
- c) As eficiências tiveram comportamento estatístico diferente entre dois grupos: os coagulantes cloreto férrico e o sulfato de alumínio versus os coagulantes óxido de cálcio e o cloreto de cálcio;
- d) As maiores eficiências observadas foram para o cloreto férrico seguida do sulfato de alumínio, para a maior parte das condições experimentais realizadas nesta pesquisa;
- e) As menores eficiências de remoção de fósforo foram para o grupo dos coagulantes óxido de cálcio e cloreto de cálcio nas para a maior parte das concentrações, o pior desempenho foi para o coagulante óxido de cálcio que apresentou as menores eficiências de remoção para a maior parte das condições experimentais;
- f) As formas fracionadas que apresentaram maiores índices de remoção, em relação à concentração real e não as médias das eficiências foram respectivamente os ortofosfatos e os polifosfatos, e a com menor índice foi para o fósforo orgânico;
- g) Os agentes coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio apresentaram a vantagem do uso direto no efluente *in natura*, sem que seja necessário o ajuste de pH, uma vez que a caracterização mostrou a constância no parâmetro de pH, estando os valores próximos ao ponto ótimo para o uso de ambos os coagulantes;
- h) Os agentes coagulantes óxido de cálcio e cloreto de cálcio além das baixas eficiências de remoções apresentaram o inconveniente de ajuste de pH do efluente, antes e após o pós-tratamento físico-químico aplicado;

- i) Para todos os coagulantes utilizados as melhores remoções observadas foram para o uso das maiores concentrações (200 mg/L e 250 mg/L);
- j) Os resultados obtidos para o coagulante cloreto férrico com o uso da maior concentração (250 mg/L) mostram que para a análise de P-Total, parâmetro de controle da legislação, os valores de remoções foram superiores ao exigido de 75% conforme vazão de descarte para os efluentes sanitários;
- k) O processo físico-químico por floculação seguido de sedimentação utilizado para o pós-tratamento de efluente sanitário pode ser vantajoso, pela possibilidade de um tratamento rápido e eficaz com resultados satisfatórios para a remoção de fósforo nas suas diferentes formas.

Sugestões para trabalhos futuros

- a) Otimizar as concentrações dos coagulantes para o tratamento físico-químico;
- b) Comparar as formas de fósforo do esgoto sanitário tratado por diferentes sistemas.

REFERÊNCIAS

ALEM SOBRINHO, P.; JORDÃO, E.P. *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios – Uma Análise Crítica*. In: Ricardo F. Gonçalves. (Org.). *Desinfecção de Efluentes Sanitários*. Editora: Rima Textos E Artes, Vitória - ES, 2003.

APHA/AWW/WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th. Edition. American Public Health Association, Washington, DC., USA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. *NBR 9648:Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário*. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. *NBR 7353:Soluções aquosas: determinação do pH com eletrodos de vidro*. Rio de Janeiro, 1989.

BANU, J. R.; KALIAPPAN, S.; YEOM, I. T. *Treatment of domestic wastewater using up flow anaerobic sludge blanket reactor*. Int. J. Environ. Sci. Tech, 2007.

BAUMGARTEN, M. G. Z; POZZA, S. A. *Qualidade de águas: Descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental*. Editora: FURG, Rio Grande - RS, 2001.

BRANDÃO, L. H.; DOMINGOS, P.; HERDY, J.S. *Fatores Ambientais para a Floração de Cianobactérias Tóxicas*. Saúde & Ambiente em Revista, Duque de Caxias, vol.1, n^o2, julho-dezembro, 2006.

BLACKALL, L. L.; CROCETTI, G.R.; SAUNDERS, A.M.; BOND, P.L. *A Review and Update of the Microbiology of Enhanced Biological Phosphorus Removal in Wastewater Treatment Plants*. Antonie Van Leeuwenhoek, Amsterdam, v. 81, n. 1, 2002.

BODIK, I.; KRATOCHVIL, K.; GASPIRKOVA.; HUTNAN, M. *Nitrogen Removal in an Anaerobic Baffled Filter Reactor With Aerobic Post-treatment*. Bioresource Technology, v. 86, 2003.

CARNEIRO, T. G.; LEITE, F; *Cianobactérias e suas toxinas*. Revista Analytica, São Paulo, Ed. 32, Dez.2007/Jan.2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução Conama n° 357/2005*. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf. Acesso em: 22 dez. 2009.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução Consema n° 128/2006*. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/Resolucao128Eflu-entes.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2009.

COSTA, C; CASTOLDI, F. L. *CoStat: um programa para quem pensa que não gosta de estatística*. Ed. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo - RS, 2009.

COSTA, T. B. *Desempenho de reator em batelada seqüencial (RBS) com enchimento escalonado no tratamento de esgoto sanitário doméstico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2005.

COSTA, V. L. *Formas de fósforo e seu transporte pela Enxurrada num latossolo que recebeu lodo de esgoto*. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), IAC - Instituto Agrônomo, Campinas - SP. 2008.

ESTEVES, F. de A. *Fundamentos de Limnologia*. 2 ed., Editora: Interciência, Rio de Janeiro - RJ, 1998.

FARIA; O. L. V. *Remoção de Fósforo de Efluentes da Parboilização de Arroz por Absorção Biológica Estimulada em Reator em Batelada Sequencial (RBS) Associada à Precipitação Química*. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2006.

FILHO, S. S. F.; MARGUTI, A. L.; PIVELI, R. P. *Produção de lodo e comportamento químico de sais de ferro empregados no pós-tratamento de esgoto sanitário por precipitação química*. Engenharia Sanitária Ambiental, v.14, n 1, janeiro-março, 2009.

GUALBERTO, F.F. *Otimização de Processos de Precipitação Química na Remoção de Fósforo de Esgotos Sanitários Mediante a Utilização de Sais de Ferro como Coagulante*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo - SP, 2009.

GASPARIKOVÁ, E.; KAPUSTA, S.; BODÍK, I.; DERCO, J.; KRATOCHVÍL, K. *Evaluation of Anaerobic-Aerobic Wastewater Treatment Plant Operations*. Polish Journal of Environmental Studies, v. 14, n 1, 2005.

HOSNI, K.; BEN MOUSSA, S.; CHACHI, A.; BEN AMOR, M. *The removal of PO_4^{3-} by calcium hydroxide from synthetic wastewater: optimization of the operating conditions*. Elsevier: Desalination, n 223, 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 4 ed. Editoração: SEGRAC, ABES, Rio de Janeiro, 2005.

KONIG, A.; CEBALLOS, B. S. O. & FLORENTINO, I. Q. B. *Avaliações do ciclo diário de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em um sistema de lagoas de estabilização em escala real*. In: 16º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1991, Goiânia, Anais. Rio de Janeiro: ABES. v.2, 1991.

LIMA, Endrigo P. P. *Pós-Tratamento em Reator com Recheio de Pedra Cálcarea de Efluentes da Parboilização do Arroz Tratados em reator UASB*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - DCTA, FAEM, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2003.

MARGUTI, A. L.; FILHO, S. S. F.; PIVELI, R. P. *Otimização de Processos Físico-Químicos na Remoção de Fósforo de Esgoto Sanitários por Processo de Precipitação Química com Cloreto Férrico*. Engenharia Sanitária Ambiental, v.13, n.4, out/dez, 2008.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. EUA: McGraw-Hill, 4ª edição, 2005.

NUNES, J. A. *Tratamento Físico-químico de Águas Residuárias Industriais*. 4. ed., editora: J. Andrade, Sergipe - SE, 2004.

NUVOLARI, A; TELLES, D.D; RIBEIRO, J.T; MIYASHITA, N.J; RODRIGUES, R.B; ARAUJO, R. *Esgoto Sanitário: Coleta Transporte Tratamento e Reúso Agrícola*. Editora: Edgard Blücher, São Paulo - SP, 2003.

OKUNUKI, S.; KAWAHARASAKI, M.; TANAKA, H.; KANAGAWA, T. *Changes in Phosphorus Removing Performance and Bacterial Community Structure in an Enhanced Biological Phosphorus Removal Reactor*. Water Research, London, v. 38, n. 9, 2004.

OSÓRIO, V. K. L. & OLIVEIRA, W. *Polifosfatos em detergentes em pó comerciais*. Química Nova, São Paulo - SP, v. 24, n. 5, 2001.

SANTOS, H. R.; *Coagulação/precipitação de efluentes de reator anaeróbio de leito expandido e de sistema de lodo ativado precedido de reator UASB, com remoção de partículas por sedimentação ou flotação*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2006.

SANTOS, H.R.; PRADO, G.S.; VIDAL, C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, J.R. *Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 9, n.4, Out/Dez, 2004.

SANTOS, M. S. *Pós-Tratamento Físico-químico e Biológico de Efluentes da Parboilização do Arroz Tratados em reator UASB*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - DCTA, FAEM, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, 2003.

SILVA, C. N. F.; LAURIA, R. G. *Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica da Substituição do Sulfato de Alumínio pelo Cloreto Férrico ou Sulfato Férrico no Tratamento de Água de Abastecimento*. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia Civil) - Fundação Educacional de Barretos Faculdades Unificadas da FEB, Barretos - SP, 2006.

SINELLI, P.H.; SILVA, S.M.C.P.; ALEM SOBRINHO, P. *Remoção de fósforo de efluente de tratamento anaeróbio por processo físico-químico*. XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.

SOUZA, R. A. S. et al. *Frações de fosfato em reservatórios de água em Lavras - MG*. Revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras, MG, v. 31, n.2, p. 357-365, 2007.

STEEN, I., *Phosphorus availability in the 21st century: managem of a non-renewable resource*. Phosphorus Potassium 217, 1998.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 3^a ed. Vol. 1 – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. UFMG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, MG, 2005.

ZHOU, Y.; XING, X.; LIU, Z.; CUI, L.; YU, A.; FENG, Q.; YANG H.; *Enhanced coagulation of ferric chloride aided by tannic acid for phosphorus removal from wastewater*. Elsevier: Chemosphere, n.72, 2008.

Apêndice A

Análise Estatística: Estatística Descritiva para o cloreto férrico

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto férrico em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação são descritas nas Tabelas 24, 25, 26, 27 e 28.

Tabela 24: Análise Descritiva para o P-Total (FeCl₃).

Fatores		Análises											
		P-Total				P-Total Solúvel				P-Total Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
FeCl ₃	100	9,56	0,65	0,43	7,69	8,99	0,23	0,05	2,88	0,57	0,42	0,18	83,11
FeCl ₃	150	6,73	0,52	0,27	8,71	5,93	0,36	0,13	6,89	0,80	0,15	0,03	22,24
FeCl ₃	200	4,94	0,38	0,14	8,68	4,51	0,24	0,05	6,04	0,43	0,13	0,02	36,23
FeCl ₃	250	2,76	0,11	0,01	4,44	2,38	0,12	0,01	6,00	0,38	0,02	3,29	5,36

Tabela 25: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (FeCl₃).

Fatores		Análises											
		Ortofosfato				Ortofosfato Solúvel				Ortofosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
FeCl ₃	100	4,79	0,06	0,00	2,09	4,73	0,08	0,01	2,09	0,06	0,03	8,61	57,85
FeCl ₃	150	4,07	0,22	0,05	6,28	3,87	0,30	0,09	8,85	0,20	0,08	0,01	42,29
FeCl ₃	200	3,24	0,08	0,01	2,67	2,94	0,24	0,05	9,25	0,29	0,16	0,03	63,36
FeCl ₃	250	2,25	0,18	0,03	8,79	2,04	0,13	0,02	7,47	0,21	0,04	0,00	21,60

Tabela 26: Análise Descritiva para os Polifosfatos (FeCl₃).

Fatores		Análises											
		Polifosfato				Polifosfato Solúvel				Polifosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
FeCl ₃	100	2,64	0,34	0,11	14,57	2,59	0,32	0,10	13,99	0,05	0,02	4,09	42,21
FeCl ₃	150	1,87	0,37	0,13	22,30	1,74	0,51	0,26	33,28	0,13	0,14	0,02	119,98
FeCl ₃	200	1,13	0,31	0,09	30,41	1,06	0,33	0,11	35,39	0,07	0,02	7,84	44,75
FeCl ₃	250	0,28	0,19	0,04	77,52	0,25	0,19	0,03	5,89	0,03	0,00	0,00	5,88

Tabela 27: Análise Descritiva para o P-Orgânico (FeCl₃).

Fatores		Análises											
		P-Orgânico				P-Orgânico Solúvel				P-Orgânico Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
FeCl ₃	100	2,13	0,37	0,14	19,57	1,67	0,00	1,58	0,27	0,46	0,38	0,14	90,99
FeCl ₃	150	0,78	0,37	0,14	54,28	0,33	0,15	0,02	53,25	0,45	0,22	0,05	55,01
FeCl ₃	200	0,57	0,15	0,02	29,89	0,50	0,14	0,02	33,49	0,07	0,00	4,62	3,51
FeCl ₃	250	0,23	0,09	0,01	44,75	0,09	0,07	0,00	90,88	0,14	0,02	0,00	16,45

Tabela 28: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (FeCl₃).

Fatores		Análises											
		DQO				DQO Solúvel				SST			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
FeCl ₃	100	70	23,17	537,08	37,23	52	2,75	7,56	5,98	90	1,41	2,00	1,77
FeCl ₃	150	51	3,14	9,87	6,87	48	5,50	30,24	12,86	82	0,00	0,00	0,00
FeCl ₃	200	46	7,85	61,71	19,26	40	10,99	120,96	30,68	76	1,41	1,00	2,09
FeCl ₃	250	36	10,21	104,30	31,53	35	6,28	39,49	20,33	53	3,53	12,50	9,36

Apêndice B

Análise Estatística: Estatística Descritiva para o sulfato de alumínio

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante sulfato de alumínio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação são descritas nas Tabelas 29, 30, 31, 32 e 33.

Tabela 29: Análise Descritiva para o P-Total ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Fatores		Análises											
		P-Total				P-Total Solúvel				P-Total Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	8,07	0,61	0,37	8,07	7,45	0,25	0,07	3,84	0,62	0,35	0,12	64,08
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	150	6,72	0,75	0,56	12,57	6,09	0,51	0,26	9,39	0,62	0,24	0,06	43,59
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	200	4,80	0,40	0,16	9,49	4,38	0,22	0,05	5,75	0,43	0,18	0,03	47,73
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	250	3,82	0,38	0,15	11,39	3,47	0,21	0,04	6,87	0,36	0,17	0,03	55,59

Tabela 30: Análise Descritiva para os Ortofosfatos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Fatores		Análises											
		Ortofosfato				Ortofosfato Solúvel				Ortofosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	4,84	0,19	0,04	4,35	4,64	0,18	0,03	4,36	0,20	0,01	5,38	4,08
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	150	4,26	0,18	0,03	4,84	4,10	0,16	0,03	4,43	0,16	0,02	4,84	15,40
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	200	2,92	0,11	0,01	4,24	2,70	0,14	0,02	5,97	0,23	0,03	0,00	16,46
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	250	2,36	0,04	0,00	1,75	2,18	0,21	0,04	10,80	0,18	0,17	0,03	180,37

Tabela 31: Análise Descritiva para os Polifosfatos ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Fatores		Análises											
		Polifosfato				Polifosfato Solúvel				Polifosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	2,81	0,41	0,17	16,50	2,78	0,40	0,16	16,26	0,03	0,01	1,18	35,93
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	150	1,91	0,30	0,09	17,78	1,68	0,22	0,05	14,90	0,23	0,08	0,01	38,82
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	200	1,03	0,20	0,04	22,35	0,99	0,18	0,03	20,92	0,05	0,02	4,74	53,03
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	250	0,53	0,13	0,02	32,68	0,42	0,12	0,01	32,68	0,11	0,01	0,00	9,54

Tabela 32: Análise Descritiva para o P-Orgânico ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Fatores		Análises											
		P-Orgânico				P-Orgânico Solúvel				P-Orgânico Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	0,42	0,38	0,14	101,54	0,04	0,03	0,00	89,00	0,38	0,35	0,12	102,91
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	150	1,49	0,54	0,29	41,03	0,31	0,44	0,20	160,40	1,18	0,09	0,01	9,24
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	200	0,85	0,31	0,10	41,12	0,69	0,18	0,03	29,79	0,16	0,13	0,02	91,35
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	250	0,93	0,29	0,08	35,13	0,87	0,00	0,29	38,61	0,07	0,01	3,84	10,53

Tabela 33: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Fatores		Análises											
		DQO				DQO Solúvel				SST			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	100	66	3,14	9,87	5,32	59	5,11	26,07	9,65	99	1,41	2,00	1,61
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	150	56	1,57	2,47	3,16	52	1,96	3,86	4,23	89	3,53	12,50	4,49
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	200	49	1,17	1,39	2,71	41	3,14	9,87	8,53	76	0,71	0,50	1,03
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	250	36	7,07	49,99	21,83	34	0,39	0,15	1,28	53	2,12	4,50	4,54

Apêndice C

Análise Estatística: Estatística Descritiva para o óxido de cálcio

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante óxido de cálcio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação são descritas nas Tabelas 34, 35, 36, 37 e 38.

Tabela 34: Análise Descritiva para o P-Total (CaO).

Fatores		Análises											
		P-Total				P-Total Solúvel				P-Total Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
CaO	100	10,30	1,18	1,41	12,95	9,50	0,63	0,40	7,45	0,80	0,55	0,31	77,86
CaO	150	9,76	1,30	1,69	14,99	8,81	1,16	1,36	14,91	0,95	0,13	0,02	15,76
CaO	200	8,59	1,11	1,22	14,51	7,84	0,62	0,39	8,94	0,74	0,48	0,23	73,15
CaO	250	8,35	1,01	1,02	13,62	7,75	0,52	0,27	7,56	0,60	0,49	0,24	91,40

Tabela 35: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (CaO).

Fatores		Análises											
		Ortofosfato				Ortofosfato Solúvel				Ortofosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
CaO	100	5,15	0,24	0,07	5,93	4,88	0,24	0,06	5,58	0,27	0,03	8,61	12,24
CaO	150	4,93	0,34	0,12	7,79	4,78	0,35	0,12	8,20	0,15	0,01	5,38	5,68
CaO	200	4,40	0,33	0,11	8,35	3,99	0,51	0,26	14,49	0,41	0,18	0,03	51,03
CaO	250	3,94	0,37	0,14	10,67	3,81	0,29	0,08	8,65	0,13	0,08	0,01	70,00

Tabela 36: Análise Descritiva para os Polifosfatos (CaO).

Fatores		Análises											
		Polifosfato				Polifosfato Solúvel				Polifosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaO	100	3,23	0,30	0,09	10,50	3,17	0,27	0,08	9,77	0,06	0,03	6,99	49,18
CaO	150	2,67	0,26	0,07	10,90	2,62	0,23	0,05	10,15	0,05	0,02	4,74	53,03
CaO	200	2,08	0,21	0,04	11,16	2,01	0,20	0,03	11,06	0,07	0,01	0,00	14,04
CaO	250	1,93	0,23	0,05	13,99	1,89	0,23	0,06	14,23	0,03	0,00	0,00	0,00

Tabela 37: Análise Descritiva para o P-Orgânico (CaO).

Fatores		Análises											
		P-Orgânico				P-Orgânico Solúvel				P-Orgânico Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaO	100	1,92	1,15	1,33	67,62	1,45	0,59	0,35	46,30	0,47	0,55	0,31	132,74
CaO	150	2,17	1,38	1,92	71,84	1,41	1,28	1,63	102,22	0,76	0,10	0,01	15,43
CaO	200	2,11	1,22	1,50	65,56	1,85	0,93	0,88	57,17	0,26	0,28	0,08	125,73
CaO	250	2,48	1,14	1,31	52,01	2,04	0,57	0,32	31,73	0,44	0,57	0,33	145,73

Tabela 38- Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (CaO).

Fatores		Análises											
		DQO				DQO Solúvel				SST			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaO	100	65	2,75	7,56	4,75	63	0,39	0,15	0,70	103	1,41	2,00	1,54
CaO	150	65	2,36	5,55	4,09	62	0,39	0,15	0,71	99	2,12	4,50	2,39
CaO	200	54	4,32	18,67	9,01	56	1,96	3,86	3,97	88	1,40	2,00	1,81
CaO	250	52	1,96	3,86	4,22	53	0,39	0,15	0,83	72	7,07	50,00	11,05

Apêndice D

Análise Estatística: Estatística Descritiva para o cloreto de cálcio

O resumo da estatística descritiva para as diferentes formas de fósforo com o uso do coagulante cloreto de cálcio em termos de média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação são descritas nas Tabelas 39, 40, 41, 42 e 43.

Tabela 39: Análise Descritiva para o P-Total (CaCl₂).

Fatores		Análises											
		P-Total				P-Total Solúvel				P-Total Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
CaCl ₂	100	9,98	1,11	1,22	12,48	9,29	0,53	0,28	6,45	0,70	0,57	0,33	92,72
CaCl ₂	150	9,67	1,18	1,39	13,74	8,95	0,72	0,52	9,06	0,72	0,46	0,21	71,97
CaCl ₂	200	8,31	0,14	0,02	1,96	7,38	0,10	0,01	1,56	0,93	0,42	0,00	5,13
CaCl ₂	250	7,37	0,16	0,03	2,49	6,84	0,38	0,14	6,27	0,53	0,22	0,04	46,19

Tabela 40: Análise Descritiva para os Ortofosfatos (CaCl₂).

Fatores		Análises											
		Ortofosfato				Ortofosfato Solúvel				Ortofosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
CaCl ₂	100	4,80	0,52	0,27	12,22	4,64	0,45	0,20	10,95	0,16	0,07	0,00	49,95
CaCl ₂	150	4,22	0,44	0,19	11,72	4,08	0,52	0,27	14,27	0,15	0,08	0,01	58,61
CaCl ₂	200	3,98	0,44	0,19	12,55	3,92	0,40	0,16	11,57	0,05	0,04	0,00	83,34
CaCl ₂	250	3,88	0,14	0,02	4,25	3,83	0,17	0,03	5,28	0,05	0,33	0,00	68,18

Tabela 41: Análise Descritiva para os Polifosfatos(CaCl₂).

Fatores		Análises											
		Polifosfato				Polifosfato Solúvel				Polifosfato Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaCl ₂	100	3,10	0,38	0,14	13,72	3,06	0,38	0,15	14,12	0,04	0,01	3,87	18,72
CaCl ₂	150	2,55	0,32	0,10	14,05	2,52	0,35	0,12	15,52	0,04	0,03	7,84	84,23
CaCl ₂	200	1,79	0,27	0,07	16,85	1,76	0,23	0,05	15,23	0,03	0,29	0,00	120,91
CaCl ₂	250	1,42	0,22	0,05	17,87	1,36	0,21	0,04	17,14	0,06	0,18	0,00	34,09

Tabela 42: Análise Descritiva para o P-Orgânico (CaCl₂).

Fatores		Análises											
		P-Orgânico				P-Orgânico Solúvel				P-Orgânico Suspenso			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaCl ₂	100	2,09	1,25	1,56	67,31	1,59	0,59	0,36	42,47	0,50	0,65	0,42	145,87
CaCl ₂	150	2,89	1,30	1,69	50,67	2,36	0,89	0,79	42,53	0,53	0,41	0,17	86,62
CaCl ₂	200	2,55	0,32	0,10	14,21	1,70	0,27	0,07	17,77	0,85	0,53	0,00	7,06
CaCl ₂	250	2,07	0,24	0,06	13,16	1,66	0,40	0,16	27,74	0,41	0,17	0,03	45,10

Tabela 43: Análise Descritiva para DQO, DQO Solúvel e SST (CaCl₂).

Fatores		Análises											
		DQO				DQO Solúvel				SST			
Reagente	Concentração	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
CaCl ₂	100	63	0,78	0,62	1,40	58	1,57	2,47	3,04	104	6,36	40,50	6,85
CaCl ₂	150	56	0,39	0,15	0,80	53	0,00	0,00	0,00	82	0,71	0,50	0,97
CaCl ₂	200	53	1,57	2,47	3,32	50	2,75	7,56	6,18	76	9,89	98,00	14,65
CaCl ₂	250	53	0,00	0,00	0,00	49	1,17	1,39	2,68	64	2,83	8,00	5,13