

**Remoção Físico-química de Fósforo por  
Floco-sedimentação Aplicada ao Pós-tratamento de  
Efluente de Abatedouro Avícola**

**Physical-chemical Removal of Phosphorous By-settling  
Floc Applied to Post-treatment of Effluent from Poultry  
Slaughterhouse**

**Rosdaéli Cecconello Menegaz**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*rosceconello@ibest.com.br*

**Lindsay Iara Pegoraro Baccarin**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*lindsayipb@yahoo.com.br*

**Marcelo Hemkemeier**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*marceloh@upf.br*

**Sidnei Dorival Baccarin**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*sidneibaccarin@yahoo.com.br*

**Andreia Derossi**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*deia\_derossi@hotmail.com*

**Andressa Decesaro**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*andressa\_decesaro@hotmail.com*

**Elisandra Fabris**

Universidade de Passo Fundo – UFP, Passo Fundo, RS

*elisandrafabris02@hotmail.com*

Recebido em 14/10/2011 - Aceito em 23/02/2012.

---

RECEN      Guarapuava, Paraná      v. 13      nº 2      p. 227-255      jul/dez      2011

**Resumo:** O lançamento de efluentes com altas cargas orgânicas por indústrias do ramo avícola vem causando sérios problemas ambientais. O acúmulo de macronutrientes, como o fósforo, é apontado como um dos responsáveis pelo fenômeno da eutrofização dos corpos hídricos, causando, assim, desequilíbrio do ecossistema aquático e degeneração da qualidade da água. Em consequência desses problemas ambientais, tornaram-se necessários estudos como o tratamento físico-químico por floco-sedimentação com o uso de diferentes agentes coagulantes (cloreto férrico, sulfato de alumínio, óxido e cloreto de cálcio) como forma de otimizar o processo para uma melhor remoção do fósforo em menor tempo. Este trabalho foi desenvolvido em três etapas: na primeira, utilizaram-se concentrações de 100 mg/L e 300 mg/L para os agente coagulante  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{CaCl}_2$ ; na segunda, foram utilizadas concentrações de 100mg/L e 300 mg/L com a mistura dos agentes coagulantes  $\text{FeCl}_3+\text{CaO}$  e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3+\text{CaO}$ ; e na terceira, otimizou-se o processo. O tempo de floculação resultante foi de aproximadamente 10 minutos com velocidade de 40rpm, enquanto a coagulação ocorreu em menor tempo (115 segundos), com velocidade de 120rpm. O tratamento físico-químico por floco-sedimentação para o pós-tratamento demonstrou ser eficiente para remoção do fósforo em efluente do ramo avícola.

**Palavras-chave:** coagulação; floculação; tratamento de efluentes.

**Abstract:** The release of effluents with high loads of organic poultry sector industries has caused serious environmental problems. The accumulation of nutrients like phosphorus, is named as one of those responsible for the phenomenon of eutrophication of water bodies, thus causing an imbalance of the aquatic ecosystem and deterioration of water quality. In consequence of these environmental problems has become necessary to study how the physical-chemical by settling floc using different coagulants (ferric chloride, aluminum sulfate, calcium oxide and calcium chloride) as a way to optimize the process for a better removal of phosphorus in the shortest time. This work was conducted in three phases. We used concentrations of 100 mg/L and 300 mg/L for the clotting agent  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{CaCl}_2$ ; in the second step we used concentrations of 100 mg/L and 300 mg/L with a mixture

of agents coagulants  $\text{FeCl}_3 + \text{CaO}$  and  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{CaO}$ ; and for the third stage the process was optimized. The resulting flocculation time was approximately 10 minutes at a speed of 40rpm, while the clotting occurred in less time (115 seconds), with a speed of 120rpm. The physico-chemical treatment by sedimentation flake-to post-treatment proved to be effective for removal of phosphorus in the effluent of the poultry industry.

**Key words:** coagulation; effluent treatment; flocculation.

## 1 Introdução

A modernização dos processos produtivos trouxe, além de riquezas e benefícios, problemas ambientais que afetam nosso planeta, causando impactos ambientais que degradam nosso habitat, o que pode acarretar em prejuízos irreparáveis. Com o rápido desenvolvimento populacional e industrial, as indústrias de alimentos tiveram que atender e se adaptar a essa nova demanda. Entre outros, houve o aumento na geração de efluentes tornando-se necessárias novas alternativas de tratamento e disposição para que os parâmetros estipulados pela legislação ambiental fossem cumpridos [1].

As indústrias de abate de frango consomem elevado volume de água potável em decorrência dos vários procedimentos utilizados para a industrialização do frango, entre eles a limpeza do frango, de equipamentos, do piso, a escaldagem e o resfriamento. Durante esses processos, ocorre a eliminação de sangue, penas, pele e gordura, deixando a água imprópria para reuso devido às altas cargas de poluentes. Este tipo de efluente exige adequado tratamento visando à redução da DQO, cor e turbidez [2]. O processo de industrialização em abatedouros tem, em virtude das características e do tipo de despejo gerado, atividade altamente poluidora, o que inspira maiores cuidados, uma vez que a produção de carne de frango vem crescendo, o que acarretará em aumento significativo do volume de efluente gerado a partir dessa atividade [3].

O ciclo do abate avícola gera uma enorme preocupação com a questão ambiental, pois se estima que para cada frango processado, o volume de água consumido seja de

aproximadamente 15L. O elevado volume de água consumida para essa finalidade requer adequado tratamento, antes que o mesmo seja lançado nos corpos hídricos receptores ou mesmo para este que possa vir a ser reutilizado em atividades menos nobres que o consumo humano [2].

Entre as diversas etapas do processamento de abate e industrializações de frangos, é indispensável o uso de água para os processos de escaldagem, depenagem, evisceração e resfriamento de carcaça, o que consequentemente acarretará para o elevado aumento do nível de efluente [4]. O quadro 1 mostra, em etapas, a geração de efluentes líquidos na indústria de abate de aves.

*Quadro 1. Geração de efluentes líquidos no abate avícola [5]*

| Operação         |                                 | Despejos   |
|------------------|---------------------------------|--|
| Área de Recepção | Recepção                        | Água de lavagem de pisos e paredes   |
| Área suja        | Sangria                         | Água de lavagem de pisos e do túnel de sangria                                   |
|                  | Escaldagem                      | Água de extravasamento e drenagem dos tanques no fim do período de processamento |
|                  | Depenagem                       | Água utilizada para o transporte de penas e lavagem de carcaça                   |
|                  | Remoção de cutículas            | Água de lavagem de pés   |
| Área limpa       | Evisceração                     | Água utilizada para o transporte de vísceras e lavagem de carcaça                |
|                  | Pré-resfriamento e resfriamento | Água de extravasamento e drenagem dos tanques no fim do período de processamento |
|                  | Gotejamento                     | Água removida das carcaças   |

Em indústrias do ramo avícola, os efluentes gerados possuem a característica de elevadas cargas de óleos e graxas, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo, variando de acordo com as atividades de produção de cada abatedouro. Também possuem alta carga de proteína e lipídios, que são os grandes responsáveis pela alteração do pH, dos sólidos totais, da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), da DQO (Demanda Química de Oxigênio) entre outros parâmetros [6].

Com o despejo de efluentes sem o devido tratamento, um dos principais problemas ambientais que ocorrem nos corpos hídricos receptores, devido à alta taxa de matéria orgânica, é a grande demanda por oxigênio dissolvido, pois este é altamente

consumido por microrganismos utilitários de matéria orgânica em sua atividade metabólica. Portanto, o processamento no abate de animais para a produção de subprodutos é um dos principais contribuintes à elevação de matéria orgânica, uma vez que este processo contribui diretamente para o aumento e a multiplicação de microrganismos utilitários de oxigênio dissolvido, diminuindo assim a vida aquática nesse meio [4].

O excesso de macronutrientes, como nitrogênio e fósforo, em meios aquáticos ocasiona o fenômeno conhecido como eutrofização. Este fenômeno é desencadeado pelo crescimento excessivo de algas o que causa um desequilíbrio no ecossistema aquático e a alteração da qualidade da água deste meio para fins nobres. Além do desequilíbrio do ecossistema aquático, existe a possibilidade do desenvolvimento e da proliferação das cianobactérias, responsáveis pela liberação de diferentes toxinas que podem ser fatais a seres humanos e animais [7].

A eutrofização causa problemas estéticos e redirecionais, tais como: aumento da concentração de bactérias heterotróficas, mortalidade dos peixes, dificuldade e elevação do custo para remoção de algas, aumento da toxicidade da água, redução de navegação, entre outros [8].

O fósforo pode ser encontrado em águas residuais na forma de fósforos orgânicos que corresponde a aproximadamente 10% da concentração total. O fósforo orgânico, quando ligado ao carbono na sua estrutura molecular (P-O-C), pode estar na sua forma solúvel e insolúvel. O fósforo na forma inorgânica corresponde à maior porcentagem das concentrações fracionadas. Pode ser encontrado na forma de fosfatos inorgânicos condensados (P-O-P), com a característica de polifosfatos ou metafosfatos cíclicos [9].

As três principais formas do fósforo em ambiente aquático são:

- Fosfato orgânico: fósforo que compõe as moléculas orgânicas;
- Ortofosfato (fosfato inorgânico) - radicais  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$  que se combina com cátions formando sais inorgânicos nas águas;
- Polifosfato ou fosfato condensado (fosfato inorgânico) polímeros de ortofosfato [10].

Existem diferentes tecnologias desenvolvidas para o tratamento prévio de efluentes industriais do ramo avícola, o tratamento físico-químico por flocos decantação está entre essas opções. Em meio aos diferentes tratamentos, são observados maiores remoções de fósforo quando se utiliza o tratamento físico-químico por flocos decantação com o uso de sais inorgânicos. Estes sais agem como agentes coagulantes diretamente nos colóides e sólidos suspensos das cargas poluentes. Os agentes coagulantes de sais de alumínio ou ferro são os mais comuns na utilização para remoção do fósforo [11].

A remoção de nutrientes, como o fósforo, pode ser feita por precipitação química com aplicação de sais de alumínio ou ferro logo antes ou após o processo biológico. O tratamento de efluente por processo físico-químico possui vantagem em relação ao processo biológico, por haver a possibilidade de alta eficiência de remoção de fósforo e por ser um processo flexível. Pode ser adaptado em estações existentes ou em fase de implantação utilizando-se de pequeno espaço físico. Os processos biológicos apresentam maior complexidade por dependerem das condições ambientais, dos substratos e da biomassa ativa, ocupando para isso uma maior área física [12].

O processo físico-químico para a remoção de fósforo é uma técnica próspera, em virtude de seu benefício na remoção deste nutriente. Apresenta algumas vantagens em relação às demais técnicas, como o fácil controle do processo e rapidez. Pode ser automatizado e principalmente ocupa menor espaço para instalação com menor custo. O processo físico-químico pode ser empregado isolado ou em conjunto com processos biológicos. A aplicação de precipitação química com processos biológicos, no tratamento, confere alta flexibilidade na remoção do fósforo, sendo possível controlar a eficiência do processo de remoção do fósforo, independentemente das condições de operação dos processos biológicos de tratamento [12, 13].

Existem critérios e padrões a serem observados por todas as fontes poluidoras que descartem seus efluentes líquidos em corpos hídricos receptores. A porcentagem mínima de remoção para o fósforo em efluente industrial é de 75%, para indústrias com despejos menores ou iguais a 10 000 m<sup>3</sup>/d. O descarte deve atender à faixa padrão mínima de concentração inferior ou igual a 1,0 mg/L (fósforo total)[14]. Portanto, torna-se cada vez mais necessária a adoção de processos que tenham como meta a

remoção de macronutrientes [11].

Este trabalho teve como principais objetivos: propor uma alternativa de pós-tratamento de efluentes avícolas pela remoção físico-químico das diferentes formas de fósforo, a fim de obter um efluente tratado com maior qualidade e que atenda aos padrões de lançamento recomendados pela legislação ambiental brasileira, e a otimização dos parâmetros do processo de floco-sedimentação.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Delimitação do trabalho

O efluente foi coletado na saída do sistema de tratamento (entre a lagoa aerada e a lagoa de maturação) de uma indústria avícola da região de Passo Fundo, RS. O mesmo foi conservado em bombonas a 4°C, para posterior caracterização e tratamento físico-químico.

O efluente foi submetido ao tratamento físico-químico com o uso de equipamento Jar-Test utilizando-se de diferentes coagulantes e concentrações.

A pesquisa foi realizada em três etapas, sendo o efluente submetido a uma caracterização inicial para a quantificação das diferentes formas de fósforo presentes. As etapas consecutivas desta pesquisa foram:

1<sup>a</sup> etapa: condição de tratamento ideal com diferentes coagulantes e concentrações;

2<sup>a</sup> etapa: condição de tratamento ideal com a mistura de diferentes coagulantes;

3<sup>a</sup> etapa: otimização do processo.

Os resultados obtidos foram analisados por métodos estatísticos, a partir do Programa Estatístico Costat, na função Anova Teste Tukey's com intervalo de confiança de 95% e  $p < 0,05$  [15].

## 2.2 Local da pesquisa

A pesquisa foi realizada nos laboratórios de operação unitária e de aulas práticas do prédio L1 da Universidade de Passo Fundo, *Campus I*.

## 2.3 Caracterização dos efluentes coletados

O efluente coletado na indústria foi caracterizado em termos de P-total, P-total Solúvel, P-total Particulado, Ortofosfato, Ortofosfato Solúvel, Ortofosfato Particulado, Polifosfato, Polifosfato Solúvel, Polifosfato Particulado, P-Orgânico, P-Orgânico Solúvel, P-Orgânico Particulado. As análises foram realizadas em duplicatas [16].

## 2.4 Tratamento físico-químico por floco-sedimentação

### 2.4.1 Operação e procedimento Jar-Test

O efluente foi submetido ao tratamento físico-químico de floco-sedimentação aplicado em batelada em recipiente de 2 L, com o uso de equipamento Jar-Test, aplicando os seguintes coagulantes: cloreto férrico, sulfato de alumínio, óxido de cálcio e cloreto de cálcio. Os experimentos foram realizados em duplicatas.

Para todos os coagulantes foram utilizados tempos específicos de otimização do processo físico-químico, 115 segundos com rotação de 120 rpm para mistura rápida e tempo de 10 minutos com rotação de 40 rpm para a etapa de mistura lenta.

O pH foi mantido *in-natura* para os coagulantes cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) e sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Para os agentes coagulantes óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) ajustou-se o pH respectivamente em 9 e 10, utilizando-se soluções de hidróxido de sódio em concentração de 1 mol/L.

### 2.4.2 Primeira etapa

Utilizaram-se os agentes coagulantes  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{CaCl}_2$  em concentrações de 100mg/L e 300 mg/L, para verificar a condição de tratamento ideal.



### 2.4.3 Segunda etapa

Utilizaram-se os coagulantes  $\text{FeCl}_3$ , e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  em concentrações de 100mg/L e 300 mg/L com adição de 60 mg/L de CaO a cada um dos agentes coagulantes, totalizando 160 mg/L para a menor concentração e 360 mg/L para a maior concentração. Esta etapa teve por objetivo verificar se a mistura dos agentes coagulantes interfere na remoção das diferentes formas do fósforo.

### 2.4.4 Terceira etapa

Realizou-se um Planejamento Fatorial Completo  $3^2$ . A ordem dos experimentos foi aleatorizada. Esta etapa foi realizada com os coagulantes  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e a mistura entre eles, com as respectivas concentrações: 300 mg/L, 450 mg/L e 600 mg/L. As variáveis de resposta foram a remoção das diferentes formas de fósforo. A tabela 1 mostra a matriz de experimentos da PFC  $3^2$ , com as variáveis reais e codificadas.

Tabela 1. Planejamento Fatorial Completo  $3^2$  para otimização

| Experimento | Tipo de coagulante ( $X_1$ )                     | Concentração do coagulante ( $X_2$ ) |
|-------------|--|--------------------------------------|
| 1           | (-1) $\text{FeCl}_3$                             | (-1) (300 mg/L)                      |
| 2           | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (-1) (300 mg/L)                      |
| 3           | (+1) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$                | (-1) (300 mg/L)                      |
| 4           | (-1) $\text{FeCl}_3$                             | (0) (450 mg/L)                       |
| 5           | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (0) (450 mg/L)                       |
| 6           | (+1) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$                | (0) (450 mg/L)                       |
| 7           | (-1) $\text{FeCl}_3$                             | (+1) (600 mg/L)                      |
| 8           | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (+1) (600 mg/L)                      |
| 9           | (+1) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$                | (+1) (600 mg/L)                      |
| 10          | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (0) (450 mg/L)                       |
| 11          | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (0) (450 mg/L)                       |
| 12          | (0) $\text{FeCl}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ | (0) (450 mg/L)                       |

## 2.5 Eficiência

Após o tratamento físico-químico foi realizado o cálculo para as eficiências de remoções para o fósforo em suas diferentes formas, utilizando-se da equação (1).

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

Sendo:

$E$  = Eficiência de remoção (%);

$C_f$  = Concentração final de fósforo em suas diferentes formas após tratamento físico-químico ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_i$  = Concentração inicial de fósforo em suas diferentes formas antes do tratamento físico-químico ( $\text{mg.L}^{-1}$ ).

## 2.6 Determinações analíticas

### 2.6.1 Análise do fósforo

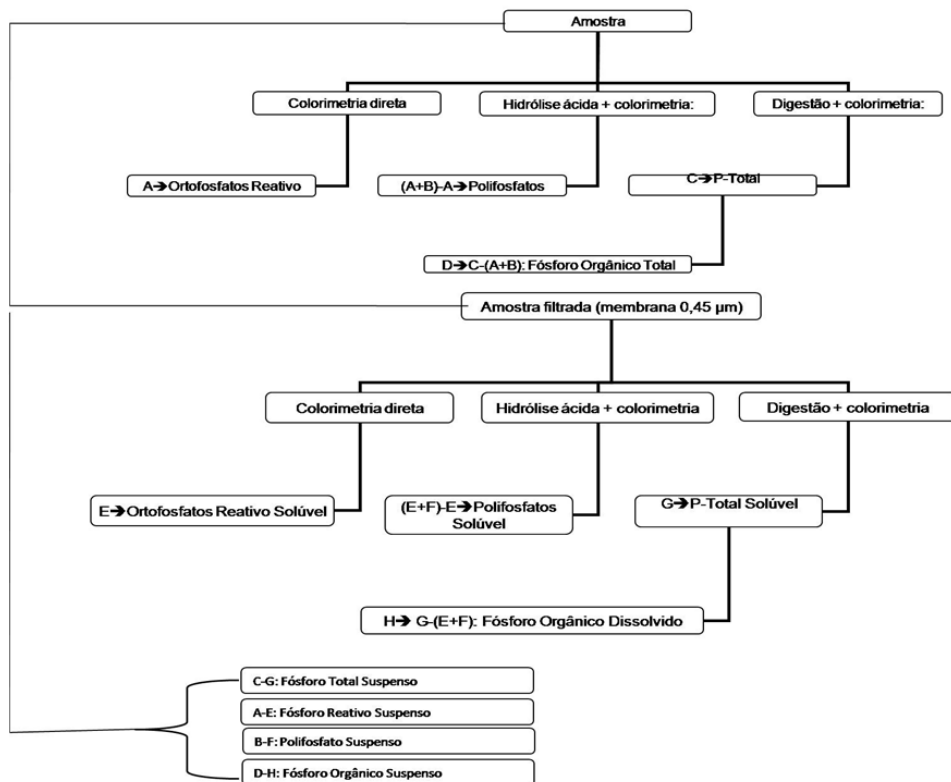


Figura 1. Adaptado Figura 4500-P:1 [16] apud [17]

As análises de fósforo para suas diferentes frações foram obtidas por meio dos métodos 4500-P “A”, 4500-P “B” e 4500-P “E” [1], seguindo como orientação etapas descritas na figura 1.

### 3 Resultados e discussão

#### 3.1 Primeira etapa

##### 3.1.1 P-total, P-total solúvel e P-total suspenso

A tabela 2 traz as eficiências de remoção para o P-total em suas diferentes formas. É possível observar que a maior eficiência de remoção de fósforo total, 77%, foi para o agente coagulante cloreto férrico na concentração de 300mg/L, enquanto a menor remoção observada foi de 26% para a concentração de 100mg/L do agente coagulante óxido de cálcio.

Tabela 2. Análises P-total após 1ª fase do tratamento físico-químico

| Formas de P | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Sulfato de Alumínio  |                 | Óxido de Cálcio      |                   | Cloreto de Cálcio    |                 |
|-------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|
|             |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  |
| P-total     | 100                               | 19,06                | 36 <sup>a</sup> | 17,72                | 41 <sup>c</sup> | 21,59                | 28 <sup>c</sup>   | 20,74                | 30 <sup>e</sup> |
| P-total     | 300                               | 6,88                 | 77 <sup>b</sup> | 10,31                | 65 <sup>d</sup> | 17,46                | 41 <sup>c,f</sup> | 16,79                | 44 <sup>f</sup> |
| P-total     | 100                               | 17,69                | 34 <sup>a</sup> | 16,04                | 40 <sup>a</sup> | 19,78                | 26 <sup>a</sup>   | 19,15                | 29 <sup>a</sup> |
| Solúvel     |                                   |                      |                 |                      |                 |                      |                   |                      |                 |
| P-total     | 300                               | 5,78                 | 78 <sup>b</sup> | 9,45                 | 65 <sup>c</sup> | 15,80                | 41 <sup>a</sup>   | 15,39                | 43 <sup>a</sup> |
| Solúvel     |                                   |                      |                 |                      |                 |                      |                   |                      |                 |
| P-total     | 100                               | 1,37                 | 50 <sup>a</sup> | 1,69                 | 41 <sup>a</sup> | 1,81                 | 35 <sup>a</sup>   | 1,58                 | 43 <sup>a</sup> |
| Suspenso    |                                   |                      |                 |                      |                 |                      |                   |                      |                 |
| P-total     | 300                               | 1,10                 | 62 <sup>a</sup> | 0,86                 | 70 <sup>a</sup> | 1,66                 | 41 <sup>a</sup>   | 1,31                 | 53 <sup>a</sup> |
| Suspenso    |                                   |                      |                 |                      |                 |                      |                   |                      |                 |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

Estatisticamente, a concentração de 300mg/L obteve o melhor desempenho diferenciando-se da concentração de 100mg/L, independente do tipo de coagulante. O

cloreto férrico apresentou diferença estatística entre os demais agentes coagulantes.

É possível com o uso do agente coagulante cloreto férrico em concentração de 250 mg/L para o pós-tratamento de efluente sanitários obter eficiências de remoções em até 81% para o P-total e para a forma solúvel deste. A forma particulada com o uso do agente coagulante cloreto férrico em concentração de 250 mg/L as eficiências foram inferiores a 68% [17].

Existem relatos de eficiências obtidas entre 80 e 90% para o tratamento de efluentes sanitários finais com o uso do cloreto férrico em concentrações que variaram de 80 mg/L a 200 mg/L para o P-total e para a forma solúvel [9].

A análise de remoção para a forma solúvel do fósforo acompanhou o comportamento do fósforo total, exceto para os coagulantes óxido e cloreto de cálcio. Para a forma suspensa não foi observada diferença significativa entre as condições experimentais.

### **3.1.2 Ortofosfato total, ortofosfato solúvel e ortofosfato suspenso**

Em análise da tabela 3 observa-se que as maiores remoções entre os agentes coagulantes foram obtidas com o uso da maior concentração (300 mg/L).

O agente coagulante cloreto férrico foi o que apresentou o melhor desempenho, obteve as melhores remoções para a maior parte das formas de ortofosfatos, diferindo estatisticamente dos demais.

A maior eficiência de remoção foi de 83% para os ortofosfatos totais com o uso do agente coagulante cloreto férrico na concentração de 300mg/L e a menor eficiência de remoção observada foi de 22% para o uso do agente coagulante óxido de cálcio na concentração de 100mg/L.

Relatos mostram que com o uso do agente coagulante cloreto férrico, em concentrações de 250 mg/L para o pós-tratamento de efluentes sanitários, podem-se obter eficiências de remoções em até 75% para as frações de ortofosfatos totais e ortofosfatos solúveis [17].

Em análise da remoção para a forma solúvel de ortofosfatos, pode-se constatar que a mesma acompanhou o comportamento dos ortofosfatos totais, exceto para o uso dos agentes coagulantes óxido e cloreto de cálcio. Para a forma suspensa ou par-

ticulada, não foi observada diferença significativa entre as condições experimentais, pelo fato de esta forma estar presente em menor quantidade no efluente em estudo.

Tabela 3. Análises de Ortofosfatos após 1ª fase do tratamento físico-químico

| Formas de P          | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Sulfato de Alumínio  |                 | Óxido de Cálcio      |                   | Cloreto de Cálcio    |                 |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|
|                      |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  |
| Ortofosfato          | 100                               | 9,48                 | 39 <sup>a</sup> | 9,55                 | 38 <sup>a</sup> | 11,84                | 22 <sup>c</sup>   | 10,73                | 30 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato          | 300                               | 2,60                 | 83 <sup>b</sup> | 4,08                 | 73 <sup>c</sup> | 8,90                 | 42 <sup>c,f</sup> | 9,19                 | 40 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato Solúvel  | 100                               | 8,78                 | 34 <sup>a</sup> | 8,65                 | 34 <sup>a</sup> | 11,09                | 15 <sup>a</sup>   | 0,75                 | 21 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato Solúvel  | 300                               | 2,06                 | 84 <sup>b</sup> | 3,72                 | 72 <sup>c</sup> | 8,58                 | 35 <sup>a</sup>   | 0,31                 | 34 <sup>d</sup> |
| Ortofosfato Suspenso | 100                               | 0,71                 | 64 <sup>a</sup> | 0,90                 | 61 <sup>a</sup> | 10,41                | 68 <sup>a</sup>   | 0,32                 | 74 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato Suspenso | 300                               | 0,54                 | 79 <sup>a</sup> | 0,36                 | 85 <sup>a</sup> | 8,62                 | 86                | 0,57                 | 85 <sup>a</sup> |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

### 3.1.3 Polifosfato total, polifosfato solúvel e polifosfato suspenso

A tabela 4 traz a lista de remoções observadas para as formas de polifosfatos. É observado que, com a maior concentração em uso desta etapa, 300 mg/L, obtiveram-se os maiores índices de remoções para todos os agentes coagulantes utilizados, porém com o uso do agente coagulante cloreto férrico obtiveram-se as melhores remoções. Os agentes coagulantes óxido de cálcio e cloreto de cálcio obtiveram as menores eficiências para ambas as concentrações utilizadas. As maiores remoções foram observadas para as formas fracionadas dos polifosfatos totais, 93%, quando utilizado o agente coagulante cloreto férrico na concentração de 300 mg/L e a menor remoção, 37%, para o uso do agente coagulante óxido de cálcio na concentração de 100 mg/L.

Foi observada diferença significativa entre os agentes coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio *versus* os agentes coagulantes óxido e cloreto de cálcio.

*Tabela 4. Análises de Polifosfatos após 1ª fase do tratamento físico-químico*

| Formas de P          | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Sulfato de Alumínio  |                 | Óxido de Cálcio      |                 | Cloreto de Cálcio    |                 |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                      |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  |
| Polifosfato          | 100                               | 5,24                 | 41 <sup>a</sup> | 5,37                 | 39 <sup>a</sup> | 5,53                 | 37 <sup>a</sup> | 5,26                 | 40 <sup>a</sup> |
| Polifosfato          | 300                               | 0,54                 | 93 <sup>b</sup> | 0,91                 | 89 <sup>c</sup> | 3,96                 | 55 <sup>d</sup> | 2,24                 | 74 <sup>c</sup> |
| Polifosfato Solúvel  | 100                               | 5,17                 | 39 <sup>a</sup> | 5,24                 | 38 <sup>a</sup> | 5,46                 | 36 <sup>a</sup> | 5,18                 | 39 <sup>a</sup> |
| Polifosfato Solúvel  | 300                               | 0,49                 | 94 <sup>b</sup> | 0,80                 | 90 <sup>c</sup> | 3,82                 | 55 <sup>d</sup> | 2,11                 | 75 <sup>c</sup> |
| Polifosfato Suspenso | 100                               | 0,07                 | 79 <sup>a</sup> | 0,14                 | 58 <sup>a</sup> | 0,07                 | 55 <sup>a</sup> | 0,08                 | 60 <sup>a</sup> |
| Polifosfato Suspenso | 300                               | 0,06                 | 82 <sup>a</sup> | 0,11                 | 68 <sup>a</sup> | 0,15                 | 79 <sup>a</sup> | 0,13                 | 70 <sup>a</sup> |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

É possível, com o uso do agente coagulante cloreto férrico, em concentrações de 250 mg/L, para o pós- tratamento de efluente sanitários, obter eficiências de remoções em até 93% para a forma de polifosfatos totais e até 88% para as formas solúveis e particulada desta fração [17].

As eficiências de remoções para as formas solúveis de polifosfatos acompanharam o comportamento dos polifosfatos totais. Para a forma suspensa ou particulada, não foi observada diferença significativa entre as condições experimentais, possivelmente pelo fato de esta forma estar presente em menor quantidade no efluente.

### 3.1.4 P-orgânico, P-orgânico solúvel e P-orgânico suspenso

Os resultados da tabela 5 mostram as eficiências de remoções para as concentrações de 100 mg/L e 300 mg/L para todos os agentes coagulantes. Observa-se que para o P-orgânico e suas diferentes formas não houve diferença significativa. O comportamento dos agentes coagulantes estatisticamente foi semelhante.

Tabela 5. Análises de P-Orgânico após 1ª fase do tratamento físico-químico

| Formas de P         | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Sulfato de Alumínio  |                 | Óxido de Cálcio      |                 | Cloreto de Cálcio    |                 |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
|                     |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  |
| P-orgânico          | 100                               | 4,34                 | 14 <sup>a</sup> | 2,80                 | 53 <sup>a</sup> | 4,22                 | 18 <sup>a</sup> | 4,75                 | 15 <sup>a</sup> |
| P-orgânico          | 300                               | 3,73                 | 23 <sup>a</sup> | 5,33                 | 13 <sup>a</sup> | 4,60                 | 15 <sup>a</sup> | 5,27                 | 15 <sup>a</sup> |
| P-orgânico Solúvel  | 100                               | 3,75                 | 18 <sup>a</sup> | 2,15                 | 58 <sup>a</sup> | 3,22                 | 27 <sup>a</sup> | 3,56                 | 23 <sup>a</sup> |
| P-orgânico Solúvel  | 300                               | 3,24                 | 27 <sup>a</sup> | 4,93                 | 15 <sup>a</sup> | 3,40                 | 22 <sup>a</sup> | 4,66                 | 19 <sup>a</sup> |
| P-orgânico Suspenso | 100                               | 0,59                 | 0 <sup>a</sup>  | 0,65                 | 20 <sup>a</sup> | 1,00                 | 8 <sup>a</sup>  | 1,19                 | 0 <sup>a</sup>  |
| P-orgânico Suspenso | 300                               | 0,50                 | 30 <sup>a</sup> | 0,40                 | 19 <sup>a</sup> | 1,20                 | 0 <sup>a</sup>  | 0,61                 | 0 <sup>a</sup>  |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

## 3.2 Segunda etapa

### 3.2.1 P-total, P-total solúvel e P-total suspenso

A tabela 6 traz os dados das remoções obtidas, concentrações finais e estatísticas da segunda etapa.

Observam-se maiores remoções quando utilizado a maior concentração (360 mg/L) entre os agentes coagulantes.

A mistura de agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio foi a que obteve os melhores índices de remoções para as formas de P-total e P-total solúvel.

Os dados mostraram a menor eficiência de remoção para o P-total em 35% para a mistura de agentes coagulantes sulfato de alumínio e óxido de cálcio na concentração de 160 mg/L. Já a maior eficiência de remoção foi de 78%, com a mistura dos agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio com o uso da maior concentração (360 mg/L).

O P-total, na sua forma solúvel, teve a menor eficiência de remoção em 32%, para a concentração em uso de 160 mg/L, com a mistura dos agentes coagulantes sulfato

de alumínio e óxido de cálcio. A maior remoção obtida no tratamento para a forma solúvel foi de 79% com o uso da mistura dos agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio com o uso da maior concentração (360 mg/L).

*Tabela 6. Análises P-total após 2ª fase do tratamento físico-químico*

| Formas de P      | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                     | Cloreto Férrico com Óxido de Cálcio |                     | Sulfato de Alumínio  |                     | Sulfato de Alumínio com Óxido de Cálcio |                     |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---|---------------------|
|                  |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>      | [ ]final de P (mg/L)                | % <sup>E</sup>      | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>      | [ ]final de P (mg/L)                    | % <sup>E</sup>      |
| P-total          | 160                               | 13,86                | 37 <sup>a</sup>     | 12,31                               | 44 <sup>d</sup>     | 13,56                | 38 <sup>a</sup>     | 14,20                                   | 35 <sup>a</sup>     |
| P-total          | 360                               | 5,22                 | 76 <sup>b</sup>     | 4,75                                | 78 <sup>b</sup>     | 6,84                 | 69 <sup>c</sup>     | 7,62                                    | 65 <sup>c</sup>     |
| P-total Solúvel  | 160                               | 12,16                | 34 <sup>a</sup>     | 11,16                               | 39 <sup>a,d</sup>   | 11,85                | 36 <sup>a</sup>     | 12,60                                   | 32 <sup>a</sup>     |
| P-total Solúvel  | 360                               | 4,65                 | 75 <sup>b</sup>     | 3,78                                | 79 <sup>b</sup>     | 5,77                 | 68 <sup>c</sup>     | 6,77                                    | 63 <sup>c</sup>     |
| P-total Suspenso | 160                               | 1,69                 | 51 <sup>a,c</sup>   | 1,16                                | 66 <sup>a,c,d</sup> | 1,70                 | 51 <sup>a,c</sup>   | 1,60                                    | 53 <sup>a,c,d</sup> |
| P-total Suspenso | 360                               | 0,56                 | 84 <sup>b,c,d</sup> | 0,97                                | 72 <sup>c,d</sup>   | 1,08                 | 68 <sup>a,c,d</sup> | 0,86                                    | 75 <sup>c,d</sup>   |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

Para a forma suspensa do P-total o agente coagulante cloreto férrico teve a melhor eficiência de remoção, 84% para a maior concentração (360 mg/L). A menor eficiência de remoção para esta forma foi de 51% quando utilizada a menor concentração (160 mg/L). A análise estatística mostra semelhanças entre os agentes coagulantes cloreto férrico, cloreto férrico com óxido de cálcio e sulfato de alumínio. A mistura dos agentes coagulantes sulfato de alumínio com o óxido de cálcio mostrou diferença significativa em relação aos demais agentes coagulantes e suas respectivas misturas.

### 3.2.2 Ortofosfato total, ortofosfato solúvel e ortofosfato suspenso

Em análise aos dados contidos na tabela 7, observa-se que com a maior concentração (360 mg/L) para os agentes coagulantes e suas respectivas misturas, obtiveram-se as maiores eficiências de remoções para todas as formas de ortofosfatos, independente



do tipo de agente coagulante.

A mistura dos agentes coagulantes cloreto férrico com o óxido de cálcio apresentou as maiores eficiências de remoções para as diferentes formas de ortofosfatos, 86%, enquanto que a menor concentração (160 mg/L) com o uso da mistura de agentes coagulantes sulfato de alumínio e óxido de cálcio obteve-se a menor eficiência de remoção, 34%.

As eficiências obtidas nesta etapa mostram que apesar da semelhança estatística entre os agentes coagulantes e suas respectivas misturas, a mistura dos agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio obteve os maiores índices de eficiências. Portanto, o agente coagulante cloreto férrico e a mistura deste ao agente coagulante óxido de cálcio foram os que obtiveram as melhores remoções entre as diferentes formas de ortofosfatos.

*Tabela 7. Análises de Ortofosfatos após 2ª fase do tratamento físico-químico*

| Formas de P          | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Cloreto Férrico com Óxido de Cálcio |                 | Sulfato de Alumínio  |                   | Sulfato de Alumínio com Óxido de Cálcio |                 |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|---|-----------------|
|                      |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L)                | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L)                    | % <sup>E</sup>  |
| Ortofosfato          | 160                               | 5,99                 | 40 <sup>a</sup> | 5,62                                | 44 <sup>a</sup> | 5,92                 | 40 <sup>a</sup>   | 6,39                                    | 36 <sup>c</sup> |
| Ortofosfato          | 360                               | 2,08                 | 79 <sup>b</sup> | 1,51                                | 85 <sup>d</sup> | 2,67                 | 73 <sup>c</sup>   | 3,37                                    | 66 <sup>f</sup> |
| Ortofosfato Solúvel  | 160                               | 5,64                 | 37 <sup>a</sup> | 5,23                                | 41 <sup>c</sup> | 5,28                 | 41 <sup>a,c</sup> | 5,85                                    | 34 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato Solúvel  | 360                               | 1,62                 | 81 <sup>b</sup> | 1,24                                | 86 <sup>c</sup> | 2,26                 | 74 <sup>d</sup>   | 3,07                                    | 65 <sup>f</sup> |
| Ortofosfato Suspenso | 160                               | 0,35                 | 54 <sup>a</sup> | 0,39                                | 64 <sup>a</sup> | 0,64                 | 41 <sup>a</sup>   | 0,55                                    | 46 <sup>a</sup> |
| Ortofosfato Suspenso | 360                               | 0,34                 | 67 <sup>a</sup> | 0,27                                | 75 <sup>a</sup> | 0,40                 | 63 <sup>a</sup>   | 0,30                                    | 69 <sup>a</sup> |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

### 3.2.3 Polifosfato total, polifosfato solúvel e polifosfato suspenso

As diferentes formas de polifosfatos da tabela 8 mostram as eficiências de remoções com o uso das diferentes concentrações (160 mg/L e 360 mg/L) dos agentes coagulantes e suas respectivas misturas.

A mistura de agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio foi a que apresentou os melhores índices de remoções para as diferentes formas de polifosfatos. Para os polifosfatos totais, a eficiência alcançada foi de 96. A forma solúvel teve eficiência máxima de 97%.

A menor eficiência de remoção observada foi de 27% quando utilizada a menor concentração (160 mg/L) para a mistura de agentes coagulantes sulfato de alumínio e óxido de cálcio.

*Tabela 8. Análises de Polifosfatos após 2ª fase do tratamento físico-químico*

| Formas de P | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                   | Cloreto Férrico com Óxido de Cálcio |                 | Sulfato de Alumínio  |                   | Sulfato de Alumínio com Óxido de Cálcio |                 |
|-------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------------|---|-----------------|
|             |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L)                | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L)                    | % <sup>E</sup>  |
| Polifosfato | 160                               | 4,03                 | 43 <sup>a</sup>   | 3,85                                | 46 <sup>a</sup> | 4,69                 | 34 <sup>c</sup>   | 4,89                                    | 31 <sup>c</sup> |
| Polifosfato | 360                               | 0,52                 | 92 <sup>b,d</sup> | 0,26                                | 96 <sup>b</sup> | 0,90                 | 87 <sup>b,d</sup> | 1,12                                    | 84 <sup>d</sup> |
| Polifosfato | 160                               | 3,46                 | 44 <sup>a</sup>   | 3,23                                | 48 <sup>a</sup> | 4,04                 | 34 <sup>c</sup>   | 4,23                                    | 31 <sup>c</sup> |
| Solúvel     |                                   |                      |                   |                                     |                 |                      |                   |   |                 |
| Polifosfato | 360                               | 0,39                 | 93 <sup>b</sup>   | 0,18                                | 97 <sup>b</sup> | 0,71                 | 88 <sup>b,d</sup> | 0,85                                    | 86 <sup>d</sup> |
| Solúvel     |                                   |                      |                   |                                     |                 |                      |                   |   |                 |
| Polifosfato | 160                               | 0,57                 | 37 <sup>a</sup>   | 0,62                                | 32 <sup>a</sup> | 0,64                 | 29 <sup>a</sup>   | 0,66                                    | 27 <sup>a</sup> |
| Suspenso    |                                   |                      |                   |                                     |                 |                      |                   |   |                 |
| Polifosfato | 360                               | 0,13                 | 85 <sup>b</sup>   | 0,08                                | 91 <sup>b</sup> | 0,19                 | 78 <sup>b</sup>   | 0,28                                    | 69 <sup>a</sup> |
| Suspenso    |                                   |                      |                   |                                     |                 |                      |                   |   |                 |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

Houve semelhança estatística entre os agentes coagulantes e suas respectivas misturas, porém as eficiências obtidas nesta etapa mostram que a mistura de agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio obteve os maiores índices de eficiências nas remoções de polifosfatos.

### 3.2.4 P-orgânico, P-orgânico solúvel e P-orgânico suspenso

Os dados da tabela 9 mostram maiores eficiências de remoções para as formas do fósforo orgânico quando se utilizou da maior concentração (360 mg/L) para os agentes coagulantes e suas respectivas misturas. Com o uso do agente coagulante cloreto férrico, obteve-se a maior eficiência para a forma suspensa, 94%, e o menor índice de remoção para a forma solúvel, 12%.

Tabela 9. Análises de P-Organico após 2ª fase do tratamento físico-químico

| Formas de P         | Concentração do Coagulante (mg/L) | Cloreto Férrico      |                 | Cloreto Férrico com Óxido de Cálcio |                   | Sulfato de Alumínio  |                   | Sulfato de Alumínio com Óxido de Cálcio |                   |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|---|-------------------|
|                     |                                   | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>  | [ ]final de P (mg/L)                | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L) | % <sup>E</sup>    | [ ]final de P (mg/L)                    | % <sup>E</sup>    |
| P-orgânico          | 160                               | 3,84                 | 19 <sup>a</sup> | 2,92                                | 37 <sup>a</sup>   | 2,95                 | 37 <sup>a</sup>   | 2,92                                    | 39 <sup>a</sup>   |
| P-orgânico          | 360                               | 2,61                 | 44 <sup>a</sup> | 3,13                                | 37 <sup>a</sup>   | 3,28                 | 29 <sup>a</sup>   | 3,13                                    | 33 <sup>a</sup>   |
| P-orgânico Solúvel  | 160                               | 3,06                 | 12 <sup>a</sup> | 2,52                                | 23 <sup>a</sup>   | 2,52                 | 19 <sup>a</sup>   | 2,52                                    | 22 <sup>a</sup>   |
| P-orgânico Solúvel  | 360                               | 2,65                 | 16 <sup>a</sup> | 2,85                                | 23 <sup>a</sup>   | 2,80                 | 21 <sup>a</sup>   | 2,85                                    | 18 <sup>a</sup>   |
| P-orgânico Suspenso | 160                               | 0,77                 | 43 <sup>a</sup> | 0,40                                | 86 <sup>b</sup>   | 0,42                 | 75 <sup>b</sup>   | 0,40                                    | 69 <sup>a,b</sup> |
| P-orgânico Suspenso | 360                               | 0,00                 | 94 <sup>b</sup> | 0,28                                | 56 <sup>a,b</sup> | 0,48                 | 67 <sup>a,b</sup> | 0,28                                    | 78 <sup>b</sup>   |

<sup>E</sup>: Estatística; %: Eficiência de remoção em porcentagem; [ ]: Concentração

Houve semelhança estatística entre os agentes coagulantes e suas respectivas misturas, porém as médias calculadas mostraram que, com a mistura dos agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio, foram obtidos os maiores índices de eficiências na remoção das diferentes frações do P-orgânico.

## 3.3 Terceira etapa

### 3.3.1 Otimização P-total, P-total solúvel e P-total suspenso

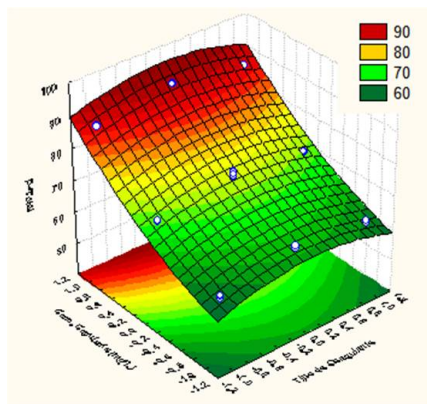
Na tabela 10 é apresentada a significância para as formas de P-total, P-total solúvel e P-total suspenso.

Tabela 10. Resumo Anova para o P-total

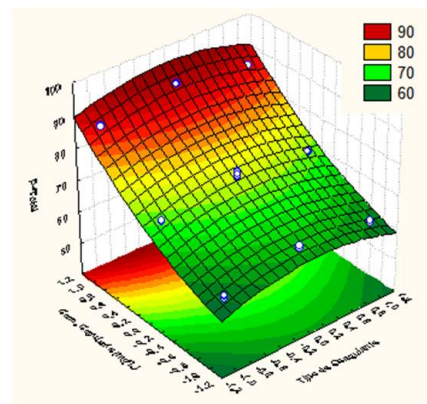
| Formas "P"       | Fatores                               | p    |
|------------------|---------------------------------------|------|
| P-total          | Tipo de coagulante (L)                | 0,02 |
|                  | Tipo de coagulante (Q)                | 0,00 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| P-total Solúvel  | Tipo de coagulante (L)                | 0,07 |
|                  | Tipo de coagulante (Q)                | 0,00 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| P-total Suspenso | Tipo de coagulante (L)                | 0,84 |
|                  | Tipo de coagulante (Q)                | 0,59 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,11 |
|                  | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |

Os dados mostram que o tipo e a concentração do coagulante tiveram influência significativa, com  $p < 0,10$ , exceto para o P-total suspenso, que apenas o termo quadrático foi significativo. Os resultados mostraram que a mistura dos coagulantes causou influência positiva na maioria das condições experimentais.

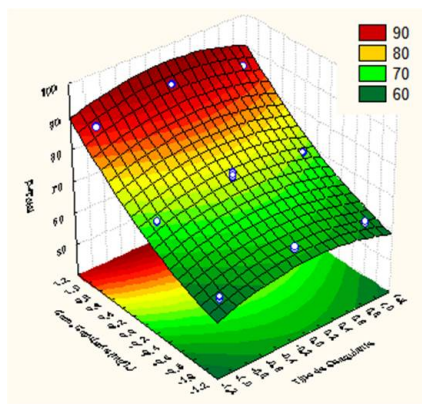
Na figura 2 é apresentada a superfície de resposta para remoção de P-total (a), P-total solúvel (b) e P-total suspenso (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2. Superfície de resposta para remoção de: (a) P-total, (b) P-total solúvel e (c) P-total suspenso

Na figura 2 (a, b) é indicado que, quanto maior a concentração do coagulante utilizada (600 mg/L), maior foi a eficiência para a remoção do fósforo total e fósforo total solúvel, chegando a 90%. Já para o fósforo total suspenso, nenhuma condição experimental influenciou significativamente na remoção.

### 3.3.2 Otimização ortofosfato, ortofosfato solúvel e ortofosfato suspenso

Na tabela 11, é mostrada a significância para as formas de ortofosfato, ortofosfato solúvel e ortofosfato suspenso.

Tabela 11. Resumo Anova para os Ortofosfatos

| Formas “P”            | Fatores                               | p    |
|-----------------------|---------------------------------------|------|
| Ortofosfatos          | Tipo de coagulante (L)                | 0,05 |
|                       | Tipo de coagulante (Q)                | 0,00 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| Ortofosfatos Solúveis | Tipo de coagulante (L)                | 0,07 |
|                       | Tipo de coagulante (Q)                | 0,00 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| Ortofosfatos Suspenso | Tipo de coagulante (L)                | 0,96 |
|                       | Tipo de coagulante (Q)                | 0,64 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,07 |
|                       | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |

Na tabela 11 é mostrado que o tipo e a concentração do agente coagulante influencia de forma significativa na remoção das diferentes formas de ortofosfatos ( $p < 0,10$ ), exceto para o ortofosfato na sua forma suspensa. Isto indica que os agentes coagulantes possuem mecanismos de remoção diferentes. A remoção do ortofosfato na forma suspensa é aumentada de forma significativa com a concentração do coagulante, indicando que a remoção desta forma de fósforo é realizada em função da remoção de sólidos suspensos, não diferindo significativamente em relação ao tipo e à concentração do agente coagulante. Cabe salientar que a faixa de remoção desta forma de fósforo é similar às demais formas.

Na figura 3 é apresentada a superfície de resposta para remoção de ortofosfato (a), ortofosfato solúvel (b) e ortofosfato suspenso (c).

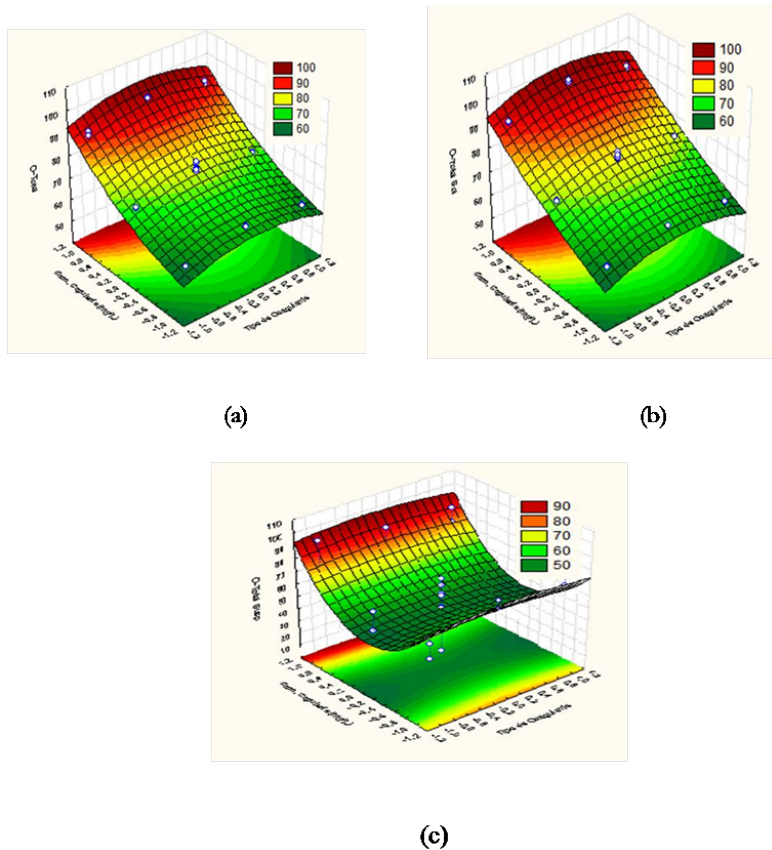


Figura 3. Superfície de resposta para remoção: (a) ortofosfato, (b) ortofosfato solúvel e (c) ortofosfato suspenso

Na figura 3 (a, b) é mostrado que quanto maior a concentração utilizada do agente coagulante (600 mg/L) melhor foi a remoção dos ortofosfatos totais e solúveis. Este comportamento foi similar para a remoção do fósforo total e fósforo total solúvel. Houve maior remoção de ortofosfatos e ortofosfatos solúveis no ponto central, com a mistura dos agentes coagulantes ( $\text{FeCl}_3$  e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), chegando a 100%. Os pontos axiais (-1 e +1) não apresentaram diferença significativa, tendo uma remoção de 90% para os coagulantes  $\text{FeCl}_3$  e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , ou seja, não foram influenciados pelas diferentes concentrações dos agentes coagulantes. Para a forma suspensa do ortofosfato, nenhuma das condições experimentais influenciou significativamente no índice de remoção.

### 3.3.3 Otimização polifosfato, polifosfato solúvel e polifosfato suspenso

Na tabela 12 é apresentada a significância para o polifosfato, polifosfato solúvel e polifosfato suspenso.

Tabela 12. Resumo Anova para os Polifosfatos

| Formas "P"             | Fatores                               | p    |
|------------------------|---------------------------------------|------|
| Polifosfatos           | Tipo de coagulante (L)                | 0,14 |
|                        | Tipo de coagulante (Q)                | 0,04 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| Polifosfatos Solúveis  | Tipo de coagulante (L)                | 0,28 |
|                        | Tipo de coagulante (Q)                | 0,05 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,00 |
| Polifosfatos Suspensos | Tipo de coagulante (L)                | 0,46 |
|                        | Tipo de coagulante (Q)                | 0,91 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,56 |
|                        | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,06 |

É possível observar nos dados apresentados na tabela 12 que apenas a concentração do agente coagulante influenciou significativamente ( $p < 0,10$ ) na remoção das diferentes formas do polifosfatos, exceto para os polifosfatos suspensos, onde nenhuma das condições experimentais influenciou significativamente.

Na figura 4 é apresentada a superfície de resposta para remoção de polifosfato (a), polifosfato solúvel (b) e polifosfato suspenso (c). Em 4a e 4b é mostrado que, quanto maior a concentração do agente coagulante (600 mg/L), melhor será a remoção dos polifosfatos e dos polifosfatos solúveis. As eficiências de remoção para os polifosfatos e os polifosfatos solúveis não obtiveram diferenças significativas no ponto central (0) e nos pontos axiais (-1 e +1), apresentando remoção máxima de 90% para os polifosfatos e 95% para os polifosfatos solúveis, não sendo influenciadas pelos diferentes tipos de agentes coagulantes e concentrações utilizados.

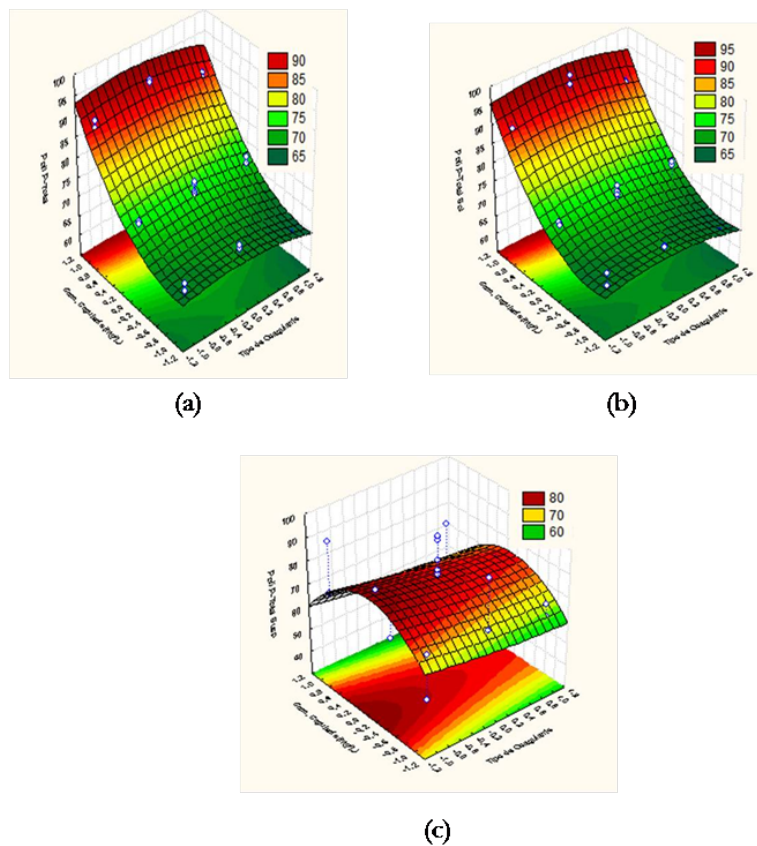


Figura 4. Superfície de resposta para remoção: (a) polifosfato, (b) polifosfato solúvel (c) polifosfato suspenso



### 3.3.4 Otimização P-orgânico Total, P-orgânico solúvel e P-orgânico suspenso

Na tabela 13, é apresentada a significância para o P-orgânico, P-orgânico solúvel e P-orgânico suspenso. Os dados mostram que assim como no caso dos polifosfatos, apenas a concentração do coagulante influenciou significativamente ( $p < 0,10$ ) na remoção do fósforo orgânico total e na sua forma solúvel. Para a remoção do fósforo orgânico suspenso não houve diferença significativa para as condições experimentais estudadas.

*Tabela 13. Resumo Anova para o P-Orgânico*

| Formas "P"          | Fatores                               | p    |
|---------------------|---------------------------------------|------|
| P-Orgânico          | Tipo de coagulante (L)                | 0,22 |
|                     | Tipo de coagulante (Q)                | 0,23 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,08 |
| P-Orgânico Solúvel  | Tipo de coagulante (L)                | 0,22 |
|                     | Tipo de coagulante (Q)                | 0,03 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,00 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,01 |
| P-Orgânico Suspenso | Tipo de coagulante (L)                | 0,95 |
|                     | Tipo de coagulante (Q)                | 0,40 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (L) | 0,58 |
|                     | Concentração do coagulante (mg/L) (Q) | 0,38 |

Na figura 5 é apresentada a superfície de resposta para remoção do P-orgânico (a), P-orgânico solúvel (b) e P-orgânico suspenso (c).

Na figura 5 (a,b) pode ser observado que, quanto maior a concentração do agente coagulante utilizado, melhor foi a sua eficiência na remoção do fósforo orgânico total e do fósforo orgânico solúvel. Isso indica que os agentes coagulantes, independente do tipo, são eficientes para a remoção dessas formas de fósforo.

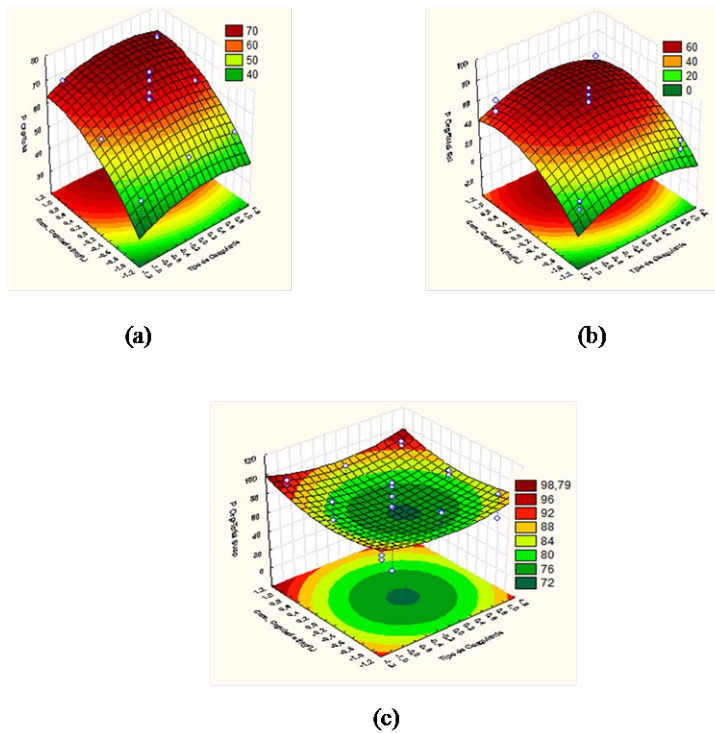


Figura 5. Superfície de resposta para remoção: (a) P-orgânico, (b) P-orgânico solúvel e (c) P-orgânico suspenso

A partir da análise estatística da otimização, foi possível observar que, quanto maior a concentração do agente coagulante, maior foi a sua eficiência de remoção das diferentes formas de fósforo presentes no efluente. Não foram observadas grandes diferenças significativas entre os coagulantes.

#### 4 Conclusão

Neste trabalho, foi comprovado que o maior índice de fósforo, presente no efluente em estudo, está na forma de ortofosfatos e o menor índice encontra-se na forma de fósforo orgânico. A forma solúvel das diferentes formas de fósforo teve predominância em relação à forma particulada.

Os agentes coagulantes cloretos férrico e sulfato de alumínio obtiveram as maiores eficiências para as remoções das diferentes formas do fósforo em relação aos

agentes coagulantes óxido de cálcio e cloreto de cálcio.

A mistura de agentes coagulantes cloreto férrico e óxido de cálcio foi a que apresentou melhores resultados de eficiências de remoções em relação ao agente coagulante cloreto férrico, porém esta diferença não foi significativa, uma vez que a mistura dos agentes coagulantes possuía uma concentração maior. A mistura dos agentes coagulantes sulfato de alumínio e óxido de cálcio não foi eficiente em relação ao uso do agente coagulante sulfato de alumínio.

Observou-se ainda que a concentração de 600 mg/L apresentou melhores resultados nas remoções entre as diferentes formas do fósforo e que os tipos de agentes coagulantes não influenciaram significativamente nos índices de remoções.

Os agentes coagulantes óxido de cálcio e cloreto de cálcio não devem ser utilizados nas mesmas concentrações apresentadas nesta pesquisa, uma vez que essas concentrações apresentaram baixa eficiência. Além do inconveniente de ajuste de pH do efluente, antes e após o pós-tratamento físico-químico aplicado. Para os agentes coagulantes cloreto férrico e sulfato de alumínio é recomendado o uso, visto que estes apresentaram melhores remoções para as diferentes formas do fósforo.

## 5 Referências

- [1] BACCARIN, L. I. P. Remoção de demanda química de oxigênio(DQO) nitrogênio amoniacal total e fósforo total por eletrólise de efluente de abatedouro avícola. Instituto de Ciências Exatas e Geociências, ICEG, Universidade de Passo Fundo, UPF, Passo Fundo, RS, 2007.
- [2] SILVA, H. L. B. Uso de membranas microporosas no tratamento de efluentes de um frigorífico de abate de aves. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 2005.
- [3] SCHOENHALS, M. Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 2006.

- [4] RIBEIRO, D. F. Influência do manejo de pré-abate e das operações de abate na qualidade e rendimento das carcaças. *Rev Nacional da Carne*, São Paulo, v. 19, n. 223, p. 38–46, 1995.
- [5] FERNANDES JR., J.; MENDES, O. Gerenciamento de efluentes de abatedouro avícolas. Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2006.
- [6] MARQUES, V. Caracterização e avaliação da eficiência do tratamento de efluentes de abatedouro avícola na região do semi-árido, 2007. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Disponível em: <http://www.saneamento.poli.ufrj.br/documentos/24CBES/II-424.pdf>. Acesso em: out/2009.
- [7] FIGUEIREDO, M. C. B.; TEIXEIRA, A. S.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; PAULINO, W. D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J. C. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatório ambiental. *Eng Sanit Ambient*, v. 12, n. 4, p. 399–409, 2007.
- [8] VON SPERLING, M. Introdução à qualidade de água e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, MG, 3ª ed., 2006.
- [9] MARGUTTI, A. L.; FILHO, S. S. F.; PIVELI, R. P. Otimização de processos físico-químicos na remoção de fósforo de esgotos sanitários por processos de precipitação química com cloreto férrico. *Eng Sanit Ambient*, v. 13, n. 4, p. 395–404, 2008.
- [10] 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 de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 2009.

- [11] WANG, Y.; HAN, T.; XU, Z.; BAO, G.; ZHU, T. Optimization of phosphorus removal from secondary effluent using simple method in Tianjin, China. *J Hazard Mater*, v. 121, n. 1-3, p. 183-186, 2005.
- [12] FERREIRA FILHO, S. S.; 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, EPUSP. *Eng Sanit Ambient*, v. 14, n. 1, p. 49-58, 2009.
- [13] FERNANDES, G. W. Avaliação de processos para remoção química de fósforo de efluente de suinocultura. dissertação de mestrado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2008.
- [14] CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução CONSEMA n° 128/2006, 2006. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/pdf/Resolucao128Efluentes.pdf>. Acesso em: out/2009.
- [15] 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.
- [16] APHA/ AWW/ WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21<sup>th</sup>. American Public Health Association, Washington, DC, USA, 2005.
- [17] BACCARIN, L. I. P. Pós-tratamento de efluente sanitário para remoção de fósforo. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, UPF, Passo Fundo, RS, 2011.

