



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.  
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

## TRATAMENTO TERCIÁRIO DE UM EFLUENTE SANITÁRIO POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Priscila Vega Andrade<sup>1</sup>; Adriano Gonçalves dos Reis<sup>2</sup>

### RESUMO

---

#### RESUMO

O Parque tecnológico de São José dos Campos dispõe de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) da qual parte da água tratada é descartada em um corpo receptor e parte é reutilizada em vasos sanitários. Este projeto analisou a inclusão de um tratamento terciário quimicamente assistido nesta ETE avaliando qual coagulante usar [ $Al_2(SO_4)_3$ , PAC ou  $FeCl_3$ ] com o intuito de aumentar a eficiência do tratamento e atender as legislações vigentes aplicáveis para reuso e descarte do efluente. Preliminarmente, foi realizada a caracterização do efluente e os testes com os coagulantes foram realizados comparando, principalmente, as respostas dos parâmetros turbidez, cor aparente, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos totais do lodo gerado. Para auxiliar na escolha do coagulante, foi utilizado o método multicritério AHP. O coagulante que se mostrou ideal para a inclusão do TQA foi o  $Al_2(SO_4)_3$  na dosagem de 200 mg/L (16,94 mg de  $Al^{3+}/L$ ), que apresentou uma remoção de 88% da turbidez e 79% da DBO.

**Palavras-chave:** *Analytic Hierarchy Process*. Tratamento terciário. Reuso de efluente

#### TERTIARY TREATMENT OF A SEWAGE BY COAGULATION, FLOCULATION AND SEDIMENTATION

#### ABSTRACT

The São José dos Campos Technology Park has a wastewater treatment plant (WWTP) which part of the treated water is discharged in a water body and part is reused in toilets. This project analyzed the inclusion of a chemically assisted tertiary treatment at the WWTP evaluating which coagulant should be used [ $Al_2(SO_4)_3$ , PAC or  $FeCl_3$ ] to increase the treatment efficiency and to comply with the applicable current legislation for reuse and discharge of wastewater. At first, the characterization of the effluent was executed and the tests with the coagulants were performed comparing the results of turbidity, apparent color, pH, biochemical oxygen demand (DBO) and solids of the sludge generated. To assist the choice of the coagulant, multicriteria AHP method was used. The coagulant that was ideal for the inclusion of TQA was  $Al_2(SO_4)_3$  at a dose of 200 mg/L (16,94 mg de  $Al^{3+}/L$ ), which presented, among the main study variables, 88% turbidity removal and a 79% BOD removal.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process. Tertiary Treatment. Wastewater Reuse.

---

<sup>1</sup>Engenheira Ambiental mestranda pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. Endereço: Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 – ICT UNESP - Eugênio de Melo - São José dos Campos – São Paulo - CEP: 12247-016. E-mail: pri.vega07@gmail.com

<sup>2</sup> Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena (EEL-USP). Mestrado e Doutorado em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Docente da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade da água pode variar tanto de acordo com os fenômenos naturais ou antropogênicos aos quais está exposta, quanto aos ciclos que pode percorrer. Além do ciclo natural, a água pode seguir por ciclos internos, nos quais o estado líquido permanece, mas as características físicas, químicas e biológicas podem mudar. Um ciclo interno ao qual estamos constantemente envolvidos é o da água bruta que é tratada e utilizada para abastecimento público ou industrial, gerando em seguida o esgoto que pode passar por tratamento e ser lançado a um corpo receptor, ou utilizado como água de reuso (VON SPERLING, 1995).

Para que este efluente gerado por indústrias, residências, instalações comerciais ou públicas seja devidamente tratado, evitando o comprometimento da

saúde pública e do equilíbrio do meio ambiente, é indispensável a revisão técnica do atendimento à legislação para adequação dos padrões de qualidade da água antes do lançamento (VON SPERLING, 1998).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 430 de 2011 (BRASIL, 2011) e com o decreto do Estado de São Paulo nº 8.468 de 1976 (BRASIL, 1976), as principais condições que devem ser seguidas para lançamento de efluentes oriundos de sistema de tratamento de esgoto sanitário diretamente em corpos receptores são descritos na Tabela 1.

Além das condições apresentadas na tabela 1, outros parâmetros orgânicos e inorgânicos citados nestas legislações devem ser periodicamente monitorados, quando aplicável (BRASIL, 2011; BRASIL, 1976).

**Tabela 1** - Condições de parâmetros que devem ser atendidas em âmbito federal e estadual para o lançamento de efluentes em corpo receptor.

Parâmetros	Limites
pH	5 a 9
Temperatura	<40°C
Sólidos sedimentáveis	≤ 1 mL/L
Subs. Solúveis em hexano (óleos e graxas)	≤ 100mg/L
Limite federal de DBO <sub>5</sub> <sup>20</sup>	≤ 120 mg/L ou Remoção mín de 60%
Limite estadual de DBO <sub>5</sub> <sup>20</sup>	≤ 60 mg/L ou Remoção mín de 80%

**Fonte:** Adaptado de BRASIL, 2011 e BRASIL, 1976.

Quando o objetivo é tratar o efluente para que, além de atender os limites de

emissões legais, este possa ser reusado, é necessário empregar outros sistemas

avancados de tratamento além daqueles utilizados para o tratamento secundário (METCALF & EDDY, 2016). A norma ABNT NBR 13969:1997 apresenta as diretrizes para unidades de tratamento complementar e disposição final de efluentes líquidos. Esta norma determina que no caso do esgoto de origem essencialmente doméstica ou com características similares, o esgoto tratado deve ser reutilizado para fins que exigem qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura, tais como irrigação dos jardins, lavagem dos pisos e dos veículos automotivos, na descarga dos vasos sanitários, na manutenção paisagística dos lagos e canais com água, na irrigação dos campos agrícolas e pastagens (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS, 1997).

O tratamento quimicamente assistido (TQA) é um tratamento de efluentes que consiste na adição de coagulantes químicos que podem aumentar a eficácia dos processos de coagulação, floculação e sedimentação. Neste processo deve haver inicialmente a mistura rápida do produto químico com a água e, em seguida, a agitação lenta do material coagulado para formação de flocos maiores (RICHTER, 2009). A introdução de um TQA, quando bem projetado e monitorado, é capaz de apresentar um maior nível de clarificação, significativa remoção turbidez

e de DBO do efluente, além de facilitar o processo de sedimentação (METCALF & EDDY, 2016; POON & CHU, 1999).

Os principais coagulantes utilizados para o processo químico são cloreto férrico, sulfato de alumínio e cloreto de polialumínio (PAC). A determinação do coagulante depende da caracterização física e química da água e do gradiente de velocidade, que representa o tempo e a intensidade da mistura do produto com a água. O lodo que é gerado através das reações químicas com os coagulantes tende a ser mais adensado devido à sedimentação que é facilitada pela aglomeração das partículas, além de corroborar com a remoção de sólidos suspensos totais através da adsorção (METCALF & EDDY, 2016; POON & CHU, 1999).

Para auxiliar na escolha de coagulantes dentro de uma gama de variáveis obtidas que influenciam na decisão, o método multicritério *Analytic Hierarchy Process* - AHP tem se apresentado eficiente. Este processo de análise hierárquica foi desenvolvido em 1980 por Thomas Saaty. Neste método o problema em questão é dividido em níveis hierárquicos de modo a contemplar o objetivo a ser atingido, os critérios que remetem o objetivo e as alternativas que envolvem a decisão (MARINS, 2009). A solução do problema de decisão é determinada através dos seguintes passos:

1) Definição do problema; 2) Estruturação hierárquica; 3) Construção de matrizes de comparação par a par; 4) utilização das prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades do nível imediatamente inferior (SAATY, 2008).

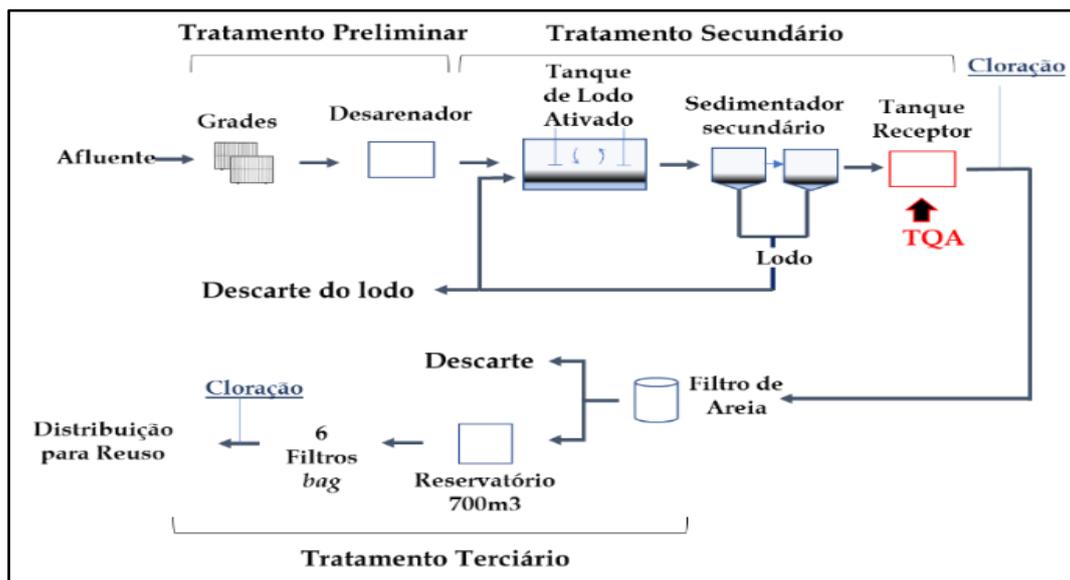
O trabalho teve como objetivo a avaliar a inclusão de um tratamento terciário quimicamente assistido para a redução da turbidez, da cor aparente e da DBO do efluente tratado no Parque tecnológico de São José dos Campos. Para isto, em bancada com o auxílio do *jar test*, foi avaliado o uso de três coagulantes – sulfato de alumínio, cloreto férrico e cloreto de polialumínio – para a clarificação da água que é utilizada como água de reuso e, ao mesmo tempo, o progresso dos parâmetros de qualidade do efluente que é lançado no corpo receptor. Diferentes dosagens dos coagulantes foram

avaliadas, e os efeitos nas propriedades físico-químicas do efluente analisados. Uma análise multicritério foi realizada para identificar o coagulante ideal para esta aplicação.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O Parque tecnológico de São José dos Campos – SP é composto por mais de 300 empresas, compreendendo centros empresariais, centros de desenvolvimento tecnológico, laboratórios multiusuários, incubadoras e institutos de pesquisa e ensino. O efluente do Parque Tecnológico passa por um tratamento dentro no próprio estabelecimento, com uma vazão média mensal de 704,5 m<sup>3</sup>/mês. A figura 1 é um desenho esquemático da Estação de Tratamento de Efluentes – ETE do Parque Tecnológico de São José dos Campos.



**Figura 1-** Fluxograma das etapas de tratamento da ETE do Parque Tecnológico – São José dos Campos.

De acordo com o esquema apresentado na Figura 1, a ETE apresenta um tratamento preliminar com um sistema de gradeamento composto por uma grade grossa e uma fina e um desarenador para reter os sólidos de maiores dimensões e areia. Em seguida, o efluente entra diretamente para um sistema secundário composto de lodos ativados com dois sedimentadores em linha. Parte do lodo deste sedimentador retorna para o início do processo biológico e parte é removida periodicamente. Na saída do decantador o efluente segue para o tanque receptor, onde as amostras foram coletadas. A partir deste tanque receptor, o efluente segue para o tratamento terciário composto, inicialmente, por uma dosagem de hipoclorito de sódio 6% que é adicionada por uma bomba dosadora, promovendo uma concentração de aproximadamente 3 ppm e, posteriormente, passa pelo filtro de areia.

Após a passagem pelo filtro de areia, parte da água é descartada no corpo receptor localizado nos arredores do estabelecimento e parte segue para um tanque de reserva de água de reuso com capacidade de 700 m<sup>3</sup>. Do tanque de reserva a água de reuso ainda segue para o restante do tratamento terciário passando por seis câmaras de filtro tipo *bag*, por uma segunda dosagem de hipoclorito de sódio

na dosagem de 3 ppm e é encaminhada para reuso em vasos sanitários do Parque Tecnológico. Porém, a administração do parque tecnológico se encontrava com os seguintes problemas com relação ao reuso da água: reclamação por parte dos usuários de cor elevada da água de descarga dos vasos sanitários e gastos excessivos de troca de filtro no sistema terciário (areia e *bags*), ou seja, carreiras de filtração muito baixas.

## 2.2 Análise das amostras

Para ter conhecimento da caracterização do efluente na área de estudo, doze amostras de 15 litros foram coletadas no tanque receptor no primeiro semestre de 2017 durante o período da manhã, quando a vazão da ETE era significativa. A partir destas amostras, as propriedades temperatura, sólidos sedimentáveis, turbidez, cor aparente, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) foram determinadas.

A turbidez e a cor aparente foram quantificadas através do turbidímetro de bancada Policontrol AP2000 e do colorímetro de bancada Policontrol AquaColor Cor IP67, respectivamente. Para obtenção de valores significativos, os resultados de cor aparente e turbidez foram derivados da média de três medidas para cada amostra. A condutividade elétrica foi mensurada com

o uso do Condutivímetro Digimed DM-32. O sensor do aparelho foi imergido em um volume de aproximadamente 500 ml da amostra e o resultado foi anotado após estabilização do aparelho.

O oxigênio dissolvido foi obtido através do emprego do Oxímetro Digimed DM-4P. Um béquer com volume de aproximadamente 500ml da amostra foi alocado no agitador magnético DiagTech DT 3110H e o sensor do oxímetro foi introduzido na amostra. O resultado foi anotado após estabilização do equipamento.

Para mensuração do pH e da temperatura foi utilizado o pHmetroLucadema Luca 210 seguindo a metodologia da NBR 9251/86 de

determinação do pH (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). A alcalinidade foi determinada de acordo com o método da titulação potenciométrica da NBR 13736/96 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Os sólidos sedimentáveis foram obtidos através da mensuração do volume sedimentado, após uma hora, da amostra colocada em um cone imhoff de 1 litro (MANUAL, 1999).

A análise de DBO foi realizado na entrada da ETE, no tanque receptor onde foi executado o estudo e após os ensaios de *jar test*.

A tabela 2 apresenta a caracterização da água de estudo de acordo com a média dos parâmetros obtidos.

**Tabela 2 - Caracterização da água de estudo.**

Parâmetros	Média	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	24,4	± 0,8
pH	7,4	± 0,1
Alcalinidade (mg/L)	115,5	± 26,9
Cor (uC)	172,5	± 28,3
Turbidez (unT)	11,2	± 6,5
S. Sedimentáveis (ml/L)	0,3	± 0,3
Condutividade (mS/cm)	896,6	± 102,7
OD (mg/L)	6,9	± 0,9
DBO entrada da ETE (mg/L)	377,0	-
DBO após biológico (mg/L)	93,0	-
Remoção DBO (%)	75,3	-

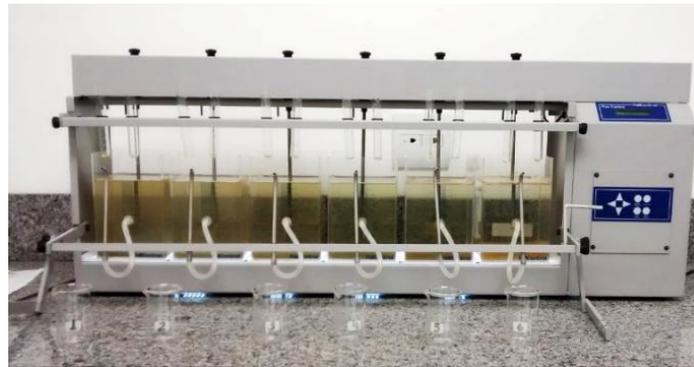
### 2.3 Ensaio de *Jar test*

Para seleção do coagulante a ser utilizado no tratamento, o equipamento de

*jar test* FlocControl III da PoliControl, exposto na Figura 2, foi utilizado com os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto

férrico e cloreto de polialumínio a fim de determinar qual o coagulante indicado para esta aplicação, considerando uma avaliação multicritérios. Coagulante cloreto de polialumínio (PAC): teor de 10,91% como  $Al_2O_3$ , basicidade livre de 62,38 % e

densidade de  $1,260 \text{ g/cm}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ . Coagulante sulfato de alumínio isento de ferro -  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14,3 H_2O$ : teor de  $Al_2O_3$  de 16%. Coagulante cloreto férrico -  $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$ , com teor mínimo de 97% de Fe.



**Figura 2** - Equipamento *jar test* utilizado para os ensaios.

No ensaio, diferentes dosagens de cada coagulante foram adicionadas em cada jarro e agitadas em um gradiente de velocidade  $G$  de  $700s^{-1}$  por um período de 30 segundos. Em seguida, as amostras flocularam com  $G$  de  $50s^{-1}$  durante 30 minutos, e depois foram decantadas numa taxa de sedimentação de  $0,5 \text{ cm min}^{-1}$  (14 min). Para a solução de PAC a 3,0 %p., foram adicionadas as seguintes dosagens em cada jarro de 2L do *jar test*: 70; 140; 210; 280; 350; 420  $\text{mg.L}^{-1}$ . Para o sulfato de alumínio a 2 %p. foram adicionados as dosagens: 50; 100; 150; 200; 250; 300  $\text{mg.L}^{-1}$  e, para o cloreto férrico a 1,5%p. foram utilizadas as dosagens 40, 80, 120, 160, 200, 240  $\text{mg.L}^{-1}$ .

Após o teste, foram determinados cor aparente, turbidez e pH do sobrenadante de

cada jarro seguindo a metodologia descrita anteriormente e os resultados foram comparados com as propriedades obtidas da água de estudo. Em uma planilha de priorização dos resultados foi calculado a remoção de turbidez, remoção de cor e alteração do pH para cada dosagem aplicada de cada coagulante. A partir destas informações foram avaliadas dosagens com melhor resultado de turbidez e cor remanescente, aliados ao pH final. Com estes valores otimizados de cada coagulante foi realizado um ensaio *jar test* para se avaliar a formação de quantidade de lodo gerada.

#### 2.4 Caracterização do lodo

O ensaio com *jar test* foi realizado com as dosagens ótimas de cada

coagulante determinadas previamente. Após a sedimentação, o volume do lodo foi mensurado na proveta e foi retirado o máximo possível de água com uma pipeta sem interferir no lodo. O lodo em solução foi transferido para um cadinho de 250mL para ser evaporado em banho maria e, em seguida, seco em estufa à 103-105°C durante 12 horas. Em seguida foi determinada a massa e os sólidos totais do lodo de cada amostra a partir da metodologia para sólidos totais descrita na NBR 10664 Águas - determinação de resíduos sólidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989).

## 2.5 Custo dos coagulantes

Para ter conhecimento sobre disponibilidade de mercado e sobre o custo associado aos coagulantes, foram contatadas três empresas de comercialização de produtos químicos que realizassem a entrega no Parque Tecnológico de São José dos Campos para solicitação de cotação dos coagulantes.

Com os preços fornecidos e tendo conhecimento da vazão média mensal da ETE das dosagens ótimas dos coagulantes, foi determinado qual o custo de cada produto químico por volume para análise de melhor custo benefício.

O primeiro passo foi calcular qual o consumo do coagulante em quilograma considerando a dosagem ideal previamente

determinada e a vazão média mensal fornecida da ETE através da equação 1.

$$G_i = \frac{D \cdot Q}{10^6} \quad (1)$$

Onde:  $G_i$  = Consumo mensal do coagulante testado em Kg;  $D$  = dosagem ideal do coagulante em mg/L;  $Q$  = Vazão média mensal em L/mês.

Como cada fornecedor pode oferecer coagulantes com diferentes concentrações de  $Al_2O_3$  ou de  $Fe^{+3}$ , o segundo passo foi calcular qual o consumo mensal em quilograma de acordo com a equação 2, considerando as especificações do coagulante fornecido e as especificações dos coagulantes utilizados nos testes.

$$G_f = \frac{C_i}{C_f \cdot G_i} \quad (2)$$

Onde:  $G_f$  = Consumo mensal do coagulante fornecido em Kg;  $C_i$  = Concentração em porcentagem do coagulante testado;  $C_f$  = Concentração em porcentagem do coagulante fornecido;  $G_i$  = Consumo mensal do coagulante testado em Kg.

Considerando então o valor fornecido por quilograma, o consumo determinado e a vazão média mensal, foi calculado o custo do produto químico por  $m^3$  a partir da equação 3.

$$R\$/m^3 = \frac{C_f \cdot P}{Q} \quad (3)$$

Onde:  $R\$/m^3$  = Custo do coagulante por metro cúbico;  $C_f$  = Concentração em

porcentagem do coagulante fornecido; P = Preço do coagulante por quilograma; Q = Vazão média mensal em L/mês.

### 2.6 Análise multicritério

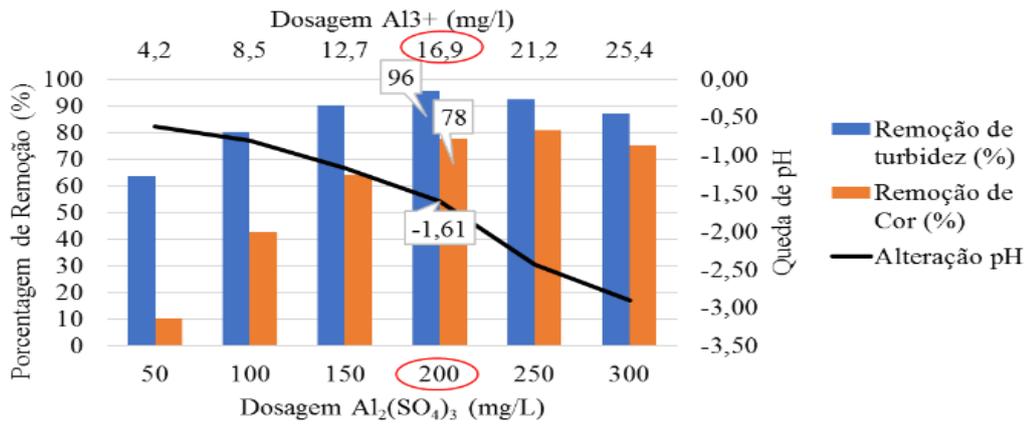
Diante da alta gama de variáveis que foram obtidas, foi utilizado um método multicritério que avaliou a priorização de resultados e, com base nas informações de consumo de coagulante com custo associado, formação lodo, facilidade no manuseio do químico, variação do pH e remoção da DBO, indicou o coagulante ideal, com a sua respectiva dosagem, para

ser aplicado. O método multicritério empregado foi o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) através do software livre *Super Decisions* (ADAMS & CREATIVE DECISIONS FOUNDATION, 2017).

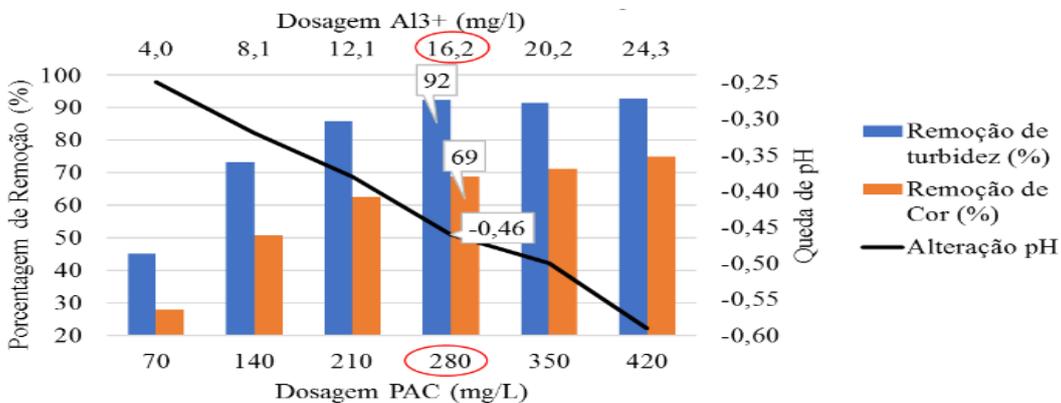
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Determinação das dosagens ideais dos coagulantes.

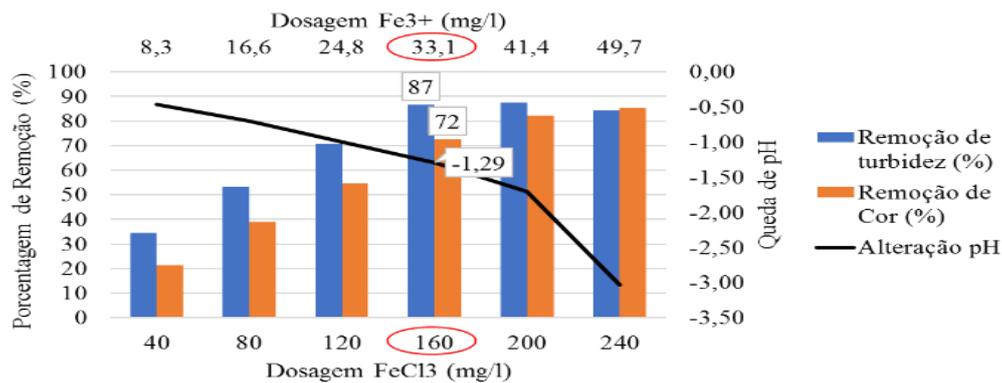
Com os resultados obtidos das análises de remoção de cor aparente e turbidez e alteração do pH com a aplicação dos coagulantes  $Al_2(SO_4)_3$ , PAC e  $FeCl_3$ , foram obtidas as Figuras 3, 4 e 5.



**Figura 3** - Gráfico da determinação das dosagens ideais do  $Al_2(SO_4)_3$  apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.



**Figura 4**- Gráfico da determinação das dosagens ideais do PAC apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.



**Figura 5** - Gráfico da determinação das dosagens ideais do FeCl<sub>3</sub> apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.

Analisando os resultados obtidos para as condições de cada coagulante apresentados nas figuras 3, 4 e 5, observa-se que os maiores valores de remoção de turbidez com as menores dosagens aplicadas foram encontrados com as dosagens de 200mg/L de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (16,9 mg Al<sup>3+</sup>/L), de 280mg.L<sup>-1</sup> de PAC (16,2 mg Al<sup>3+</sup>/L) e 160mg/L de cloreto férrico (33,1 mg Fe<sup>3+</sup>/L). No caso dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico, dosagens acima destes valores poderiam resultar em uma queda do pH que se aproxima de ultrapassar o limite inferior de pH de lançamento do Decreto n° 8.468/76 e da Resolução CONAMA n° 430/11 (pH entre 5,0 e 9,0) (BRASIL, 1976; BRASIL, 2011).

Deste modo, as dosagens de 200mg.L<sup>-1</sup> de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (16,9 mg Al<sup>3+</sup>/L), de 280mg.L<sup>-1</sup> de PAC (16,2 mg Al<sup>3+</sup>/L) e

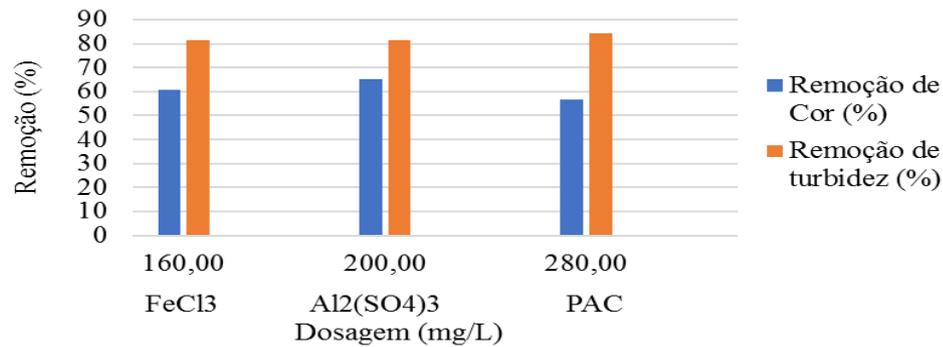
160mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico (33,1 mg Fe<sup>3+</sup>/L), indicadas com círculos vermelhos nas Figuras 3, 4 e 5, foram definidas como ótimas.

Em relação às taxas de remoção, os valores obtidos foram de 96 % - Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, 93% - PAC e 87% - FeCl<sub>3</sub> para turbidez, e de 78 % - Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, 69% - PAC e 72% - FeCl<sub>3</sub> para cor, vide Figuras 3, 4 e 5. Estes resultados revelam que as dosagens ótimas aplicadas foram eficazes e apresentaram respostas similares de remoção de cor e turbidez.

### 3.2 Comparação das dosagens ideais dos coagulantes.

#### 3.2.1. Cor aparente e turbidez

A Figura 6 apresenta a remoção de turbidez e de cor em porcentagem para a aplicação de cada uma das dosagens ideais dos coagulantes.



**Figura 6** - Resposta de remoção de turbidez e de cor aparente após análise em jar test com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e PAC.

A remoção de turbidez com a aplicação dos três coagulantes proporcionou resultados abaixo de 5 unT. Estes valores de turbidez, de acordo com as classificações dos parâmetros dos esgotos para reuso da NBR 13969/97, se enquadram desde a classe 3 de reuso em descargas de vasos sanitários, a qual requer turbidez inferior à 10 unT, até as classes 1 para contato direto do usuário e classe 2 para reuso em lavagens de pisos e irrigação de jardins, que exigem turbidez inferior a 5 unT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997).

A capacidade de remoção de turbidez após os tratamentos resulta, conseqüentemente, na redução dos sólidos em suspensão do efluente (RICHTER, 2009). Isto infere que, após o tratamento quimicamente assistido, o efluente chegará nos filtros com menor quantidade de sólidos em suspensão, diminuindo a frequência da necessidade de limpeza dos filtros. Os valores numéricos finais de cor aparente para ambas taxas de sedimentação

respeitam ou se aproximam do padrão de corpo receptor de classe 2 e 3 de 75 mg Pt/L determinados pela Resolução CONAMA n° 357/05 (BRASIL, 2005).

Levando em consideração estes resultados, considera-se que os três coagulantes de estudo foram eficientes na remoção de cor aparente e turbidez, e não será levada em consideração este fator nos critérios de análise multicritério.

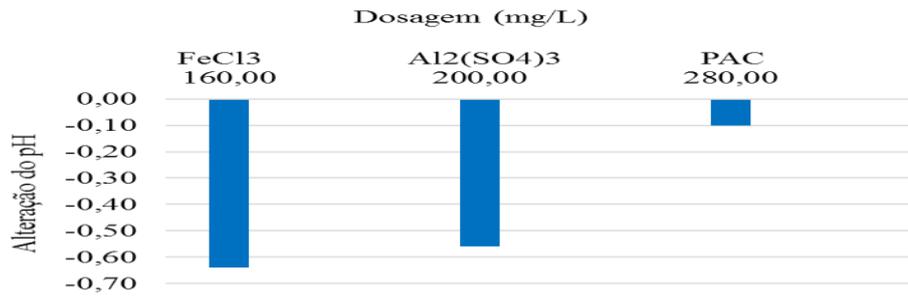
### 3.2.2. Variação do pH

Em relação ao pH, a figura 7 apresenta a variação do pH do efluente após a aplicação o tratamento quimicamente assistido com os três diferentes coagulantes.

A queda expressiva do pH para o sulfato de alumínio e para o cloreto férrico é nítida quando comparado com a sutil alteração do pH do com adição do PAC.

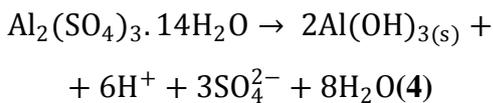
A reação de coagulantes metálicos com água normalmente produz íons H<sup>+</sup>, os quais são responsáveis pela redução da alcalinidade natural da água bruta

(RICHTER, 2009). Este fenômeno é observado na adição dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto de ferro.

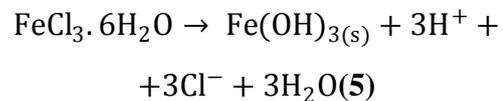


**Figura 7** - Variação do pH após análise em *jar test* com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e PAC.

A reação que ocorre ao adicionar sulfato de alumínio na água é apresentada na equação 4 simplificada (RICHTER,2009).



A solubilidade do sulfato de alumínio depende que a faixa de pH permaneça entre 5 e 7, ou seja, fora desta faixa a coagulação não é eficiente ou não ocorre. Diferentemente do sulfato de alumínio, o cloreto férrico é capaz de atuar em uma faixa mais ampla de pH, sendo capaz de realizar a coagulação com pH entre 4 e 11 (RICHTER, 2009). Desse modo, quando a alcalinidade natural da água bruta não é suficiente para tamponar o pH, os íons H<sup>+</sup> podem reduzir o pH a um valor abaixo dos padrões de lançamento (entre 5 e 9). A reação de precipitação da adição de cloreto férrico à água é dada pela equação 5 (HOWE, 2016).



Tanto para o sulfato de alumínio quanto para o cloreto férrico, podem haver casos em que a alcalinidade natural da água não seja capaz de neutralizar o pH de maneira que a queda de pH possa prejudicar o tratamento. Nestes casos, pode ser adicionada alcalinidade através de soda cáustica (NaOH), cal [Ca(OH)<sub>2</sub>] ou barrilha (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). No entanto, a necessidade de adição de alcalinidade acarreta em uma maior produção de lodo e maior custo associado (HOWE, 2016).

O PAC, por ser um polímero inorgânico de fórmula geral Al<sub>n</sub>(OH)<sub>m</sub>(Cl)<sub>3-n-m</sub>, é capaz de produzir uma maior proporção hidróxido-alumínio (OH/Al) (CONSTANTINO & YAMAMURA, 2009). Esta característica permite que o PAC libere durante a hidrólise, em igualdade de dosagem em íons metálicos, uma quantidade de ácido

consideravelmente menor do que a liberada pelo sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico. Isso provoca uma menor variação do pH do meio tratado e um menor consumo de neutralizante para ajustar o pH do meio tratado ao seu valor original (CONSTANTINO & YAMAMURA, 2009).

Como houve uma variação significativa nos resultados, esta variável será levada em conta na análise multicritério.

### 3.2.3. Kg de lodo

A produção de lodo em massa obtida através de testes para os tratamentos com os três coagulantes é apresentada na Fig. 8.

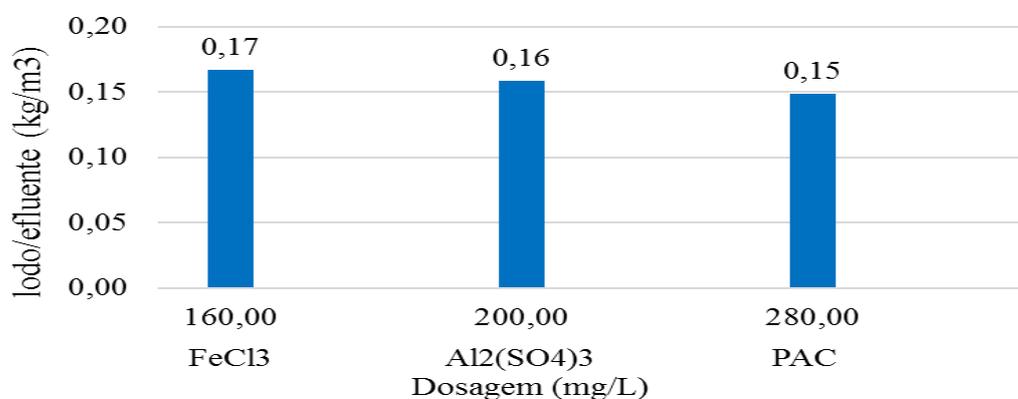
A diferença na geração de massa seca de lodo não se mostrou significativa. Nestas condições, a resposta da massa seca de lodo gerada também não será usada como critério na análise multicritério para escolha do coagulante mais adequado.

### 3.2.4. Sólidos totais de lodo

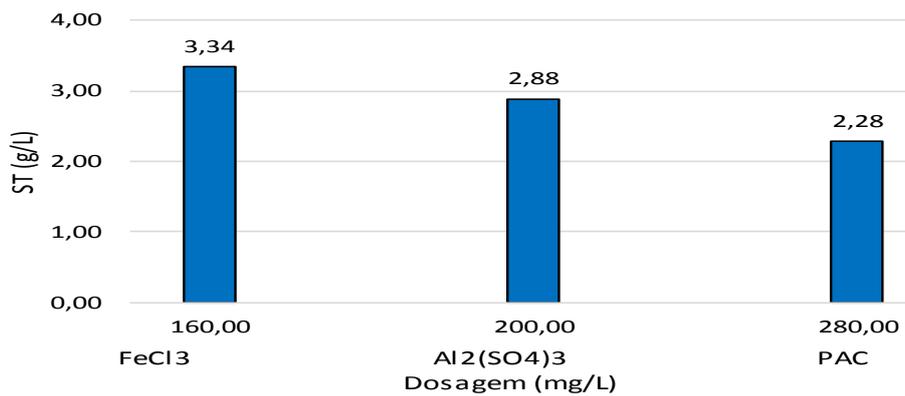
Após o período de 2 horas de sedimentação, foi mensurado o volume do lodo através das provetas. O volume aparente de lodo observado foi de 100 ml para o cloreto férrico (1), 110 ml para o sulfato de alumínio (2), e de 130 ml para o PAC (3).

Para uma melhor análise da constituição de massa no volume, foi calculado os sólidos totais através da massa obtida, dividindo a massa do lodo seco pelo volume sedimentando. Os valores são apresentados na Figura 9.

O cálculo de sólidos totais de lodo em gramas por litro representa a compactabilidade do precipitado. Analisando a figura 10 verifica-se uma proximidade entre os sólidos totais do sulfato de alumínio e do PAC.



**Figura 8-** Quilograma de lodo em relação ao volume de efluente após análise em jar test com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e PAC.



**Figura 9** - Sólidos totais (g/l) presente no lodo após sedimentação para os diferentes coagulantes testados.

Esta resposta pode ser justificada ao considerar que o PAC, sendo constituído de espécies monoméricas e poliméricas de alumínio, em fase líquida tende a polimerizar as espécies de alumínio formando hidróxido metálico, comportamento semelhante ao do sulfato de alumínio (FERREIRA FILHO, 2009).

A compactibilidade do sulfato de alumínio é parcialmente baixa dado que o lodo gerado pela adição de sulfato de alumínio costuma apresentar baixa compressibilidade, ou seja, um alto volume com baixo teor de sólidos (KATAYAMA, 2015).

O cloreto férrico apresentou o melhor resultado de capacidade de compactação. Esta alta compressibilidade de sólidos é justificada pela estrutura do precipitado do ferro que se mostra ser mais compacto e inerte quando comparado ao precipitado do alumínio (HOWE, 2016).

Considerando que esta variável apresentou diferenças significativas, também será avaliada via multicritério.

### 3.3 Análise Multicritério

Através da avaliação de parâmetros físicos e químicos do efluente após a aplicação da dosagem ideal de cada coagulante, foram selecionados cinco critérios a serem utilizados na análise multicritério. Os critérios são apresentados e descritos a seguir:

Custo do coagulante por m<sup>3</sup>: Como um mesmo volume de água de estudo demanda diferentes dosagens de cada coagulante para o melhor tratamento, o custo do coagulante por metro cúbico é imprescindível para comparação dos gastos para cada alternativa. A partir dos dados dos testes realizados em laboratório com os coagulantes e através das especificações concedidas pelos fornecedores apresentadas na tabela 3, foi calculado qual seria o custo de coagulante por volume.

**Tabela 3 - Especificações dos coagulantes obtidas pelo fornecedor.**

Condição do fornecedor	
Coagulantes	Concentração
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	16% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
PAC	18% de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
FeCl <sub>3</sub>	38% de Fe

Remoção de DBO (%): A demanda bioquímica de oxigênio é o parâmetro mais usado para medir a concentração da poluição orgânica existente no esgoto doméstico e envolve a quantidade de oxigênio dissolvido usado pelos microrganismos para oxidação bioquímica da matéria orgânica. Ao mensurar a DBO, é estimado a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar a matéria orgânica (METCALF & EDDY, 2016).

Neste contexto, se um efluente é lançado a um corpo receptor com uma DBO elevada, o consumo de oxigênio será alto e poderá prejudicar o desempenho de outros organismos. A tabela 4 apresenta os valores obtidos de DBO no tanque receptor e após os tratamentos com dosagens ideais de cada coagulante, além de apresentar a remoção relativa ao valor obtido no tanque receptor.

**Tabela 4-** Valores de DBO em mg/l e em remoção em relação à amostra após o tratamento biológico.

Amostra após	mg/L	Remoção (%)
Tratamento biológico	106	-
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	22	79%
FeCl <sub>3</sub>	51	52%
PAC	61	42%

Compactibilidade de lodo (g/L): Normalmente é mais vantajoso uma maior concentração de lodo bem compactada do que uma menor concentração com parte em solução. Esta vantagem se dá pela facilidade na retirada e transporte do lodo, pela frequência na retirada do lodo que pode ser reduzida já que será demandado um maior tempo para

acumulação de uma quantidade considerável de lodo e, quanto maior a compactibilidade do lodo, menor o gasto energético exigido para desaguamento e secagem do lodo.

Queda do pH: Esse critério é referente à alteração de pH consequente do tratamento quimicamente assistido. A adição da maioria dos coagulantes resulta

na queda de pH devido à liberação de íons  $H^+$  que reduzem a alcalinidade e produzem  $CO_2$  (RICTHER, 2009). Um pH muito baixo pode tanto afetar a eficiência da coagulação quanto fazer com que o efluente não atenda aos padrões de lançamento.

**Risco à saúde:** Consiste na análise da classificação de risco à saúde que o produto químico pode proporcionar através do diamante de hommel de cada coagulante (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA 704). A classificação de risco à saúde do diamante de hommel varia de 0 (menor risco) a 4 (maior risco) de modo que estes índices representam:

0 – Material que, em caso de incêndio, não oferece perigo além do representado pelo combustível comum.

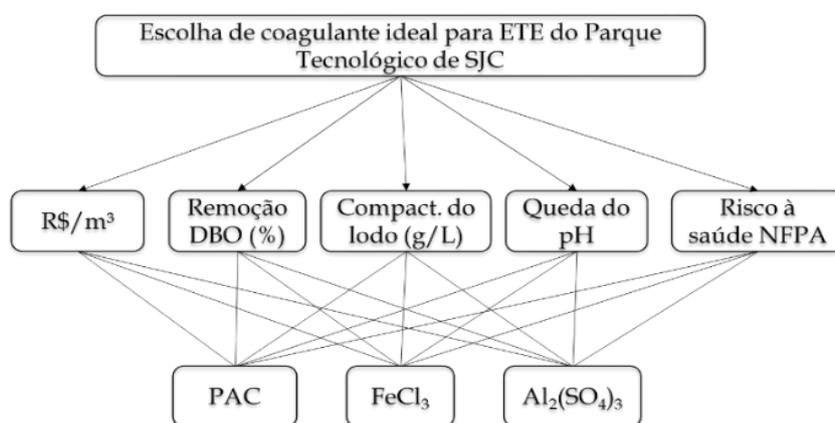
1 – Material que pode causar significativa irritação.

2 – Material que pode causar temporária incapacitação ou possível sequela.

3 – Material que pode causar lesões sérias ou sequelas.

4 – Material que pode ser letal.

Definidos o objetivo, as alternativas de solução e os respectivos critérios considerados, foi construída a estrutura hierárquica do problema, conforme Figura 10.



Abreviatura	Descrição
R\$/m <sup>3</sup>	Custo do coagulante por m <sup>3</sup> de efluente tratado
Remoção de DBO (%)	Remoção de DBO em porcentagem
Compact. do lodo (g/L)	Compactibilidade de lodo (g/L)
Queda do pH	Queda do pH
Risco à saúde NFPA	Risco à saúde NFPA 704

**Figura 10** - Estrutura hierárquica da análise multicritério.

Em seguida, foi realizada a comparação par a par entre os critérios através da matriz de decisão. Nesta etapa foram julgados os graus de importância de

acordo com a escala fundamental de Saaty entre dois critérios com base no objetivo principal do problema, como apresentado na Figura 11.

Comparisons wrt "Escolha de coagulante ideal para ETE do Parque Tecnológico SJC" node in "2Criteria" cluster

1.	1 R\$/m3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	2Remoção DBO
2.	1 R\$/m3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3Compatibilida~
3.	1 R\$/m3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4Queda de pH
4.	1 R\$/m3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5Risco à saúde ~
5.	2Remoção DBO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3Compatibilida~
6.	2Remoção DBO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4Queda de pH
7.	2Remoção DBO	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5Risco à saúde ~
8.	3Compatibilida~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4Queda de pH
9.	3Compatibilida~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5Risco à saúde ~
10.	4Queda de pH	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5Risco à saúde ~

Figura 11 - Comparação entre os critérios de escolha de acordo com o grau de importância determinado pelo usuário.

Como as prioridades da matriz de decisão são determinadas pelo usuário do software, pode haver inconsistência no caso do grau de importância entre dois critérios se contradizerem com a prioridade definida para outras comparações. Para evitar esta falha, o método AHP calcula a

inconsistência de toda matriz e aceita como tolerante os valores que seja menor ou igual a 0,1 ( FREITAS, 2006). A Figura 12 apresenta a normalização do grau de importância que cada critério apresenta a o valor de inconsistência total de 0,08490, que se enquadra no desejado.

Inconsistency: 0.08490		
1 R\$/m3		0.20203
2Remoção ~		0.36113
3Compacti~		0.07060
4Queda de~		0.04476
5Risco à ~		0.32148

Figura 12- Normalização do grau de importância dos critérios com valor total de inconsistência.

Analisando as barras da Figura 12, que indicam o grau de importância normalizado entre os critérios, é notório que os critérios “remoção de DBO”

(0,36113) e “risco à saúde” (0,32148) apresentam valores muito semelhantes e elevados, enquanto que a queda de pH e a compatibilidade apresentam os menores

valores. Esta variação é resultado das atribuições de importância que foram determinados na matriz de decisão (Figura 11) para o caso específico deste estudo.

Para a solução final do problema, além de levar em consideração o grau de importância na comparação par a par, os valores diretos de cada critério são normalizados de acordo com a relevância em função de sua respectiva caracterização. A tabela 5 apresenta os

valores diretos para cada critério com os respectivos gráficos de barra dos valores normalizados. Os gráficos de barra dos dados normalizados na tabela 5 permitem que seja comparado qual alternativa de coagulante leva vantagem com os valores diretos de cada critério. Para melhor visualização, as barras em verde representam a alternativa com melhor resultado para cada opção.

**Tabela 5 - Dados diretos e normalizados dos critérios utilizados no método AHP.**

Critérios	Valores Diretos			Gráfico de valores normalizados		
	A	B	C	A	B	C
	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	PAC	FeCl <sub>3</sub>			
R\$/m <sup>3</sup> efluente tratado	0,42	0,39	0,51			
Remoção da DBO (%)	79	42	52			
Compatibilidade do lodo (g/l)	2,88	2,28	3,34			
Queda de pH	0,56	0,1	0,64			
Risco à saúde (NFPA 704)	1	2	2			

Comparando os gráficos dos valores normalizados de cada critério na tabela 5, é verificado que o PAC (B) apresenta as melhores respostas para dois dos cinco critérios – custo e queda de pH. O cloreto férrico, apesar de manifestar a melhor resposta para compatibilidade do lodo, não apresenta resultados positivos para os outros critérios. Em contrapartida, o sulfato de alumínio, além de revelar o menor risco à saúde, apresenta resultados significativos para a remoção de DBO, que são os critérios de maior relevância.

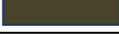
A decisão da melhor alternativa de coagulante depende tanto da correlação entre os valores específicos dos critérios para cada alternativa, quanto da comparação do grau de importância entre os critérios. A tabela 6 apresenta o resultado final da melhor alternativa computada pelo software. Na tabela 6, a coluna “Normal” corresponde aos valores normalizados em relação aos critérios e, a coluna “Ranking” é o ranqueamento dos coagulantes.

De acordo com a síntese dos resultados finais apresentado na tabela 6, o sulfato de alumínio é o coagulante ideal a

ser utilizado na ETE do Parque Tecnológico de São José dos Campos (Ranking = 1). Apesar de o PAC ter apresentado melhor desempenho em dois de 5 critérios (Tabela 5), como foi atribuído significativa importância aos critérios de risco à saúde e remoção de

DBO, em função da segurança do técnico que terá que manusear o produto químico e à qualidade da água receptora de afluente, respectivamente, o sulfato de alumínio atingiu o primeiro lugar no ranking do melhor coagulante.

**Tabela 6** - Ranking e resultados finais dos coagulantes obtidos pelo software.

Coagulante	Gráfico	Normal	Ranking
PAC		0,30	2
FeCl <sub>3</sub>		0,28	3
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		0,42	1

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo da inclusão de um tratamento terciário quimicamente assistido na estação de tratamento de efluente do parque tecnológico de São José dos Campos permite conduzir às seguintes conclusões:

- Os coagulantes em estudo, PAC, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> e FeCl<sub>3</sub>, mostraram-se eficientes na remoção de cor, turbidez e DBO do efluente. Após aplicação de qualquer um destes coagulantes, o efluente passou a atingir os limites de DBO para lançamento em um corpo receptor de acordo com o Decreto n°8468/76 e também passou a estar apto, em relação à turbidez, para reuso em vasos sanitários (classe 3) e em irrigação de plantas e lavagens de

pisos (classe 2) de acordo com a NBR 13969/97;

- Nos critérios de custo do coagulante por m<sup>3</sup> de efluente tratado, remoção de DBO, compactibilidade do lodo, queda no pH e risco à saúde, os coagulantes apresentam diferentes resultados, e uma tomada de decisão levando em consideração estes critérios se fez necessária.
- A análise multicritério AHP mostrou-se uma ferramenta efetiva para auxiliar o usuário na tomada de decisões quando vários critérios, com diferentes pesos, são apresentados. Importante ressaltar que o peso dos critérios deve ser bem avaliado pois estes podem alterar o resultado da avaliação;

Em virtude dos fatos mencionados, a inclusão de um tratamento terciário

quimicamente assistido no tanque receptor após o tratamento secundário da ETE do Parque Tecnológico de São José dos Campos, utilizando  $Al_2(SO_4)_3$  na dosagem de 200 mg/ L (16,94 mg de  $Al^{3+}$  /L) é a condição mais adequada a ser aplicada neste processo.

## 5. REFERÊNCIAS

- ADAMS, B. & CREATIVE DECISIONS FOUNDATION. **SuperDecisions. Version 2.6.0 – RC1. 2016.** Disponível em: <<https://superdecisions.com/downloads/>>. Acesso em: 24 maio 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -. NBR 10664/89 – Águas - **Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico.** 1989
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -. NBR 13736/96 – Água – **Determinação de alcalinidade – Método titulométrico.** 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13969/97: **Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos** - Projeto, construção e operação, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9251 – **Água - Determinação do pH - Método eletrométrico.** 3p. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Fevereiro de 1986.
- BRASIL, SÃO PAULO. Decreto nº 8.468 de 8 de setembro de 1976. **Dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.**
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho. Brasília, 2011.
- CONSTANTINO, A. F.; YAMAMURA, V. D. **Redução do Gasto Operacional em Estação de Tratamento De Água Utilizando O PAC.** p. 1–10, 2009.
- FERREIRA FILHO, S. S.; WAELEKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 317–326, 2009.
- FREITAS, A. L. P.; MARINS, C. S.; SOUZA, D. D. O. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. **Gepros**, v. 2, n. 1, p. 51–60, 2006.
- HOWE, K. J., et al. **Princípios de tratamento de água.** São Paulo: Cengage, 624p. 2016.
- KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica.** 2012.139 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo, 2012.

- MANUAL, Q. A. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** Part 4000 INORGANIC NONMETALLIC CONSTITUENTS Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1999.
- MARINS, C. S.; SOUZA, D. DE O.; BARROS, M. DA S. **O Uso Do Método De Análise Hierárquica ( AHP ) Na Tomada De Decisões Gerenciais - Um Estudo.** Xli Sbp, p. 11, 2009.
- METCALF & EDDY, **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5ª Edição. Porto Alegre, 1980 p., 2016.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA 704 - **Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response.** 2017.
- POON, C.S.; CHU, C.W. **The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process.** Chemosphere, v. 39, n. 10, p. 1573-1582, 1999.
- RICHTER, C.A. **Água: Métodos e Tecnologias de Tratamento.** São Paulo: Blucher, 2009.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.
- VON SPERLING, M. **Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos.** Revista brasileira de recursos hídricos, v. 3, n.1, p. 111-132, Jan/Mar, 1998.
- VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos,** v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.