



EMPREGO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP) NA DEFINIÇÃO DO COAGULANTE IDEAL PARA TRATAMENTO TERCIÁRIO DE EFLUENTE: UM ESTUDO DE CASO

Adriano Gonçalves dos Reis⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena (EEL/USP – Lorena/SP). Mestre e Doutor em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA – São José dos Campos/SP). Professor Doutor do Departamento de Engenharia Ambiental no Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (ICT/Unesp – São José dos Campos/SP).

Priscila Vega Andrade⁽²⁾

Engenheira Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (ICT/Unesp – São José dos Campos/SP) e mestra em Engenharia Civil e Ambiental na área de concentração de Saneamento pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEB/Unesp – Bauru/SP)

Geane Garcia Chales⁽³⁾

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (Unifeb – Barretos/SP), mestra e doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental na área de concentração de Saneamento pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEB/Unesp – Bauru/SP).

Endereço⁽¹⁾: Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 – Eugênio de Melo – São José dos Campos – São Paulo – CEP: 12247-016 – Brasil - Tel.: +55 (12) 3947-9700 – e-mail: adriano.reis@unesp.br

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 (TQA) nesta ETE avaliando qual coagulante mais adequado [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 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 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 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: Tratamento Terciário, Coagulação, *Analytic Hierarchy Process*.

INTRODUÇÃO

O esgoto, sendo um efluente gerado após ser utilizado em uma variedade de aplicações, pode ser tornar impróprio para variados usos. O esgoto bruto acumulado pode promover uma elevada concentração de material orgânico, fazendo com que os nutrientes presentes estimulem o crescimento descontrolado de plantas promovendo um desequilíbrio no ecossistema. Além disso, a decomposição do esgoto é responsável pela geração de maus odores e a concentração deste efluente pode torná-lo séptico por efeito de organismos patogênicos presentes (METCALF e EDDY, 2016, p. 4).

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 (SOARES, 2002; VON SPERLING, 1998).

De acordo com a Resolução CONAMA n° 430 de 2011 e com o decreto do Estado de São Paulo n° 8.468 de 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.

**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 DBO₅²⁰	≤ 120 mg/L ou Remoção mín. de 60%
Limite estadual de DBO₅²⁰	≤ 60 mg/L ou Remoção mín. de 80%

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2011 e SÃO PAULO, 1976.

Além das condições apresentadas na Tabela 1, outros parâmetros orgânicos e inorgânicos citados nestas legislações devem ser periodicamente monitorados, quando aplicável (BRASIL, 2011; SÃO PAULO, 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 avançados de tratamento, além daqueles utilizados para o tratamento secundário (METCALF & EDDY, 2016). De acordo com a norma ABNT NBR 13969:1997, efluentes de origem essencialmente doméstica ou com características similares devem ser reutilizados para fins que exijam qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura, 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. (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 (ABREU, 2000; MARINS, 2009).

OBJETIVO

O presente projeto tem 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 de um *jar test*, foi avaliado o uso de três coagulantes – sulfato de alumínio, cloreto férrico e PAC – 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.

METODOLOGIA UTILIZADA

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 m³/mês. A Figura 1 é um desenho esquemático da Estação de Tratamento de Efluentes – ETE do Parque Tecnológico de São José dos Campos.

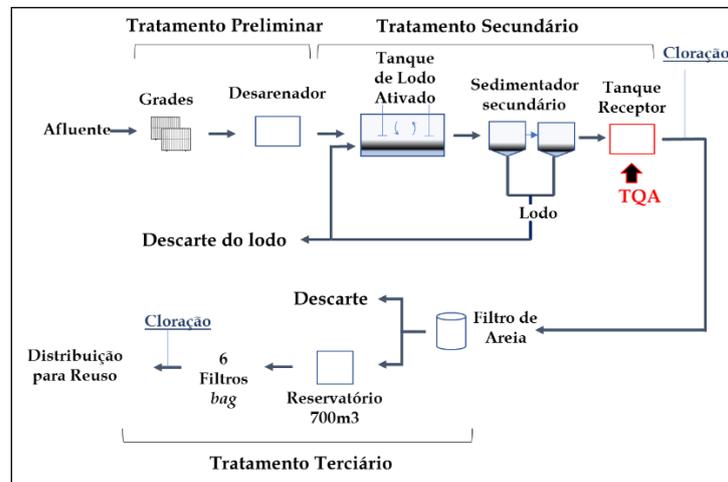


Figura 1: Fluxograma das etapas de tratamento da ETE do Parque Tecnológico – São José dos Campos.

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 e parte segue para um tanque de reserva de água de reuso com capacidade de 700 m³. 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 *bag*), ou seja, carreiras de filtração muito baixas.

ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Para ter conhecimento da caracterização do efluente na área de estudo, doze amostras de 15 litros foram coletadas no tanque receptor. 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. A condutividade elétrica foi mensurada com o uso do Condutímetro Digimed DM-32. O oxigênio dissolvido foi obtido através do emprego do Oxímetro Digimed DM-4P e do agitador magnético DiagTech DT 3110H.



Para mensuração do pH e da temperatura foi utilizado o pHmetro Lucadema 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, através do método respirométrico, 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	-

ENSAIOS DE JAR TEST

Os ensaios foram realizados através do equipamento de *jar test* Floc Control III da PoliControl com a aplicação dos seguintes coagulantes: 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°C . Sulfato de alumínio isento de ferro - $Al_2(SO_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2O$: teor de Al_2O_3 de 16%. Cloreto férrico - $FeCl_3 \times 6 \text{ H}_2O$, com teor mínimo de 97% de Fe.

No ensaio, diferentes dosagens de cada coagulante foram adicionadas em cada jarro e agitadas em um gradiente de velocidade G de 700 s^{-1} por 30 segundos. Em seguida, as amostras floccularam com G de 50 s^{-1} durante 30 minutos, e depois foram decantadas numa taxa de sedimentação de $0,5 \text{ cm/min}$ (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 mg/L. Para o sulfato de alumínio a 2 % p. foram adicionados as dosagens: 50; 100; 150; 200; 250; 300 mg/L e, para o cloreto férrico a 1,5% p. foram utilizadas as dosagens 40, 80, 120, 160, 200, 240 mg/L. 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 estudos para definição das dosagens com melhor resultado.

CARACTERIZAÇÃO DO LODO

Novo ensaio com *jar test* foi realizado com as dosagens ótimas de cada coagulante determinadas previamente. Após a sedimentação, o volume do lodo foi mensurado, e o lodo em solução foi transferido para um cadinho de 250 ml para ser evaporado em banho maria e, em seguida, seco em estufa à $103-105^\circ\text{C}$ 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).

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. Foi determinado o custo de cada produto químico por volume para análise de melhor custo benefício.

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 DBOs, 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 *SuperDecisions* (ADAMS & CREATIVE DECISIONS FOUNDATION, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados obtidos das análises de remoção de cor aparente e turbidez e alteração do pH com a aplicação dos coagulantes $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, PAC e FeCl_3 , foram obtidas as Figuras 2, 3 e 4.

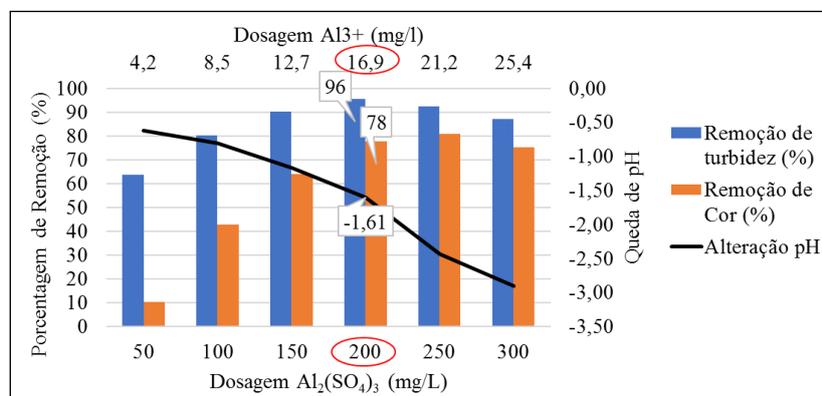


Figura 2: Gráfico da determinação das dosagens ideais do $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.

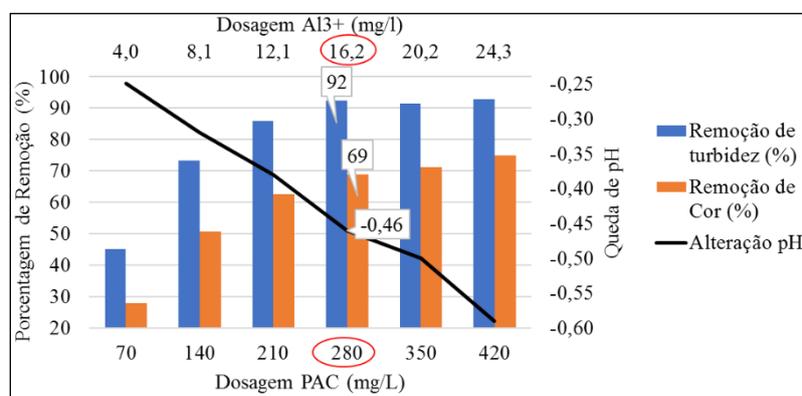


Figura 3: Gráfico da determinação das dosagens ideais do PAC apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.

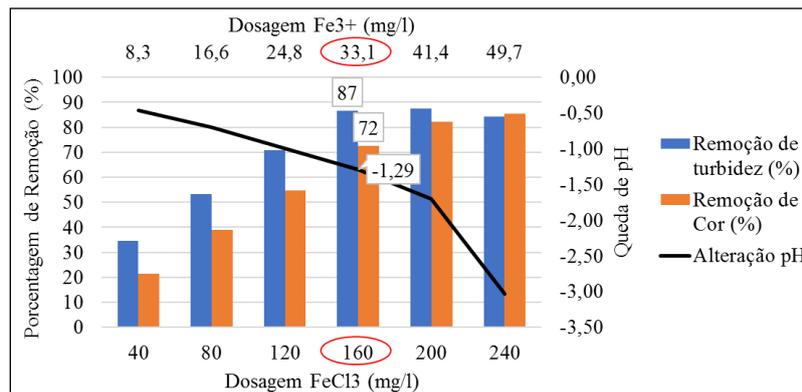


Figura 4: Gráfico da determinação das dosagens ideais do FeCl₃ apresentando porcentagem de remoção de turbidez e de cor e queda de pH em função da dosagem do coagulante.

Analisando os resultados obtidos para as condições de cada coagulante apresentados nas Figuras 2, 3 e 4, observa-se que os maiores valores de remoção de turbidez com as menores dosagens aplicadas foram encontrados com as dosagens de 200 mg/L de Al₂(SO₄)₃ (16,9 mg Al³⁺/L), de 280 mg/L de PAC (16,2 mg Al³⁺/L) e 160 mg/L de cloreto férrico (33,1 mg Fe³⁺/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) (SÃO PAULO, 1976; BRASIL, 2011).

Deste modo, as dosagens de 200 mg/L de Al₂(SO₄)₃ (16,9 mg Al³⁺/L), de 280 mg/L de PAC (16,2 mg Al³⁺/L) e 160 mg/L de cloreto férrico (33,1 mg Fe³⁺/L), indicadas com círculos vermelhos nas Figuras 3, 4 e 5, foram definidas como ótimas.

A Figura 5 apresenta a remoção de turbidez e de cor em porcentagem para a aplicação de cada uma das dosagens ideais dos coagulantes.

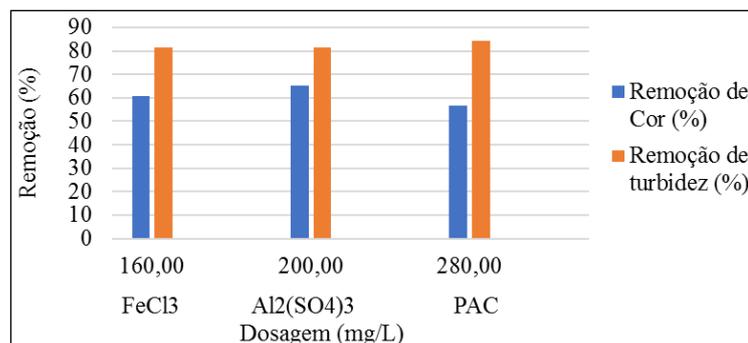


Figura 5: Resposta de remoção de turbidez e de cor aparente após análise em jar test com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ e PAC.

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 efluentes 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 as 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.

Em relação ao pH, a Figura 6 apresenta a variação do pH do efluente após a aplicação o tratamento quimicamente assistido com os três diferentes coagulantes.

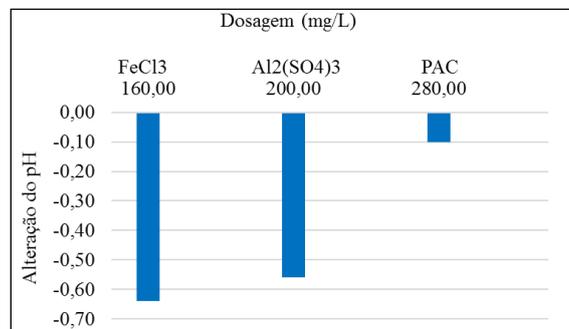


Figura 6: Variação do pH após análise em *jar test* com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ e PAC.

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 com adição do PAC. A reação de coagulantes metálicos com água normalmente produz íons H⁺, 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. Como houve uma variação significativa nos resultados, a queda do pH será levada em conta na análise multicritério.

A produção de lodo em massa obtida através de testes para os tratamentos com os três coagulantes é apresentada na Figura 7.

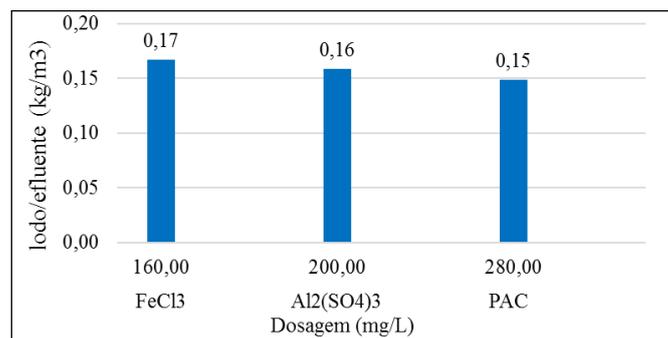


Figura 7: Quilograma de lodo em relação ao volume de efluente após análise em *jar test* com as dosagens ideais dos coagulantes FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ e PAC.

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.

O volume aparente de lodo observado após o período de 2 horas de sedimentação 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) (vide Figura 8).

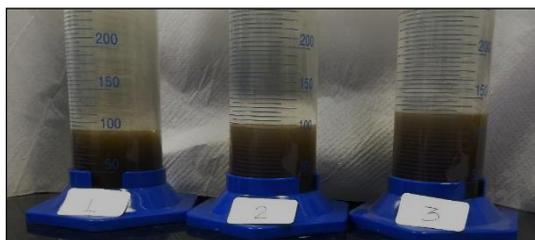


Figura 8: Volume aparente do lodo dos coagulantes FeCl_3 – (1), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – (2) e PAC – (3).

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.

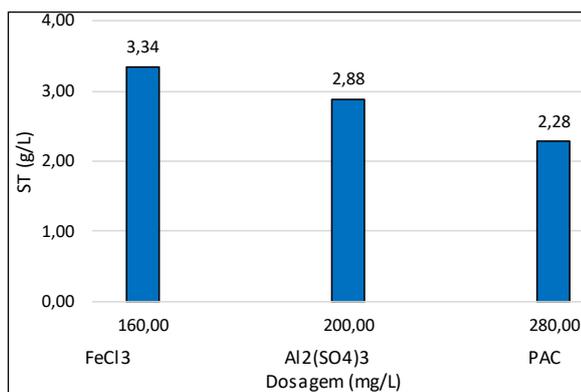


Figura 9: Sólidos totais (g/l) presente no lodo após sedimentação para os diferentes coagulantes testados.

O cálculo de sólidos totais de lodo em gramas por litro representa a compactibilidade do precipitado. Analisando a Figura 9, verifica-se uma proximidade entre os sólidos totais do sulfato de alumínio e do PAC. 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.

A Tabela 3 apresenta os resultados da DBO para o efluente coletado após o tratamento biológico (na área de estudo) e após os tratamentos com os coagulantes $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 e PAC.

Tabela 3: 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	-
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	22	79%
FeCl_3	51	52%
PAC	61	42%

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

Através da avaliação de parâmetros físicos e químicos do efluente após a aplicação da dosagem ideal de cada coagulante, a análise multicritério foi aplicada aos cinco critérios a seguir: Custo do coagulante por m^3 ; Remoção

de DBO; Compactibilidade de lodo (g/L); Queda do pH; Risco à saúde com base na avaliação do diamante de hommel de cada coagulante (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFP4 704).

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

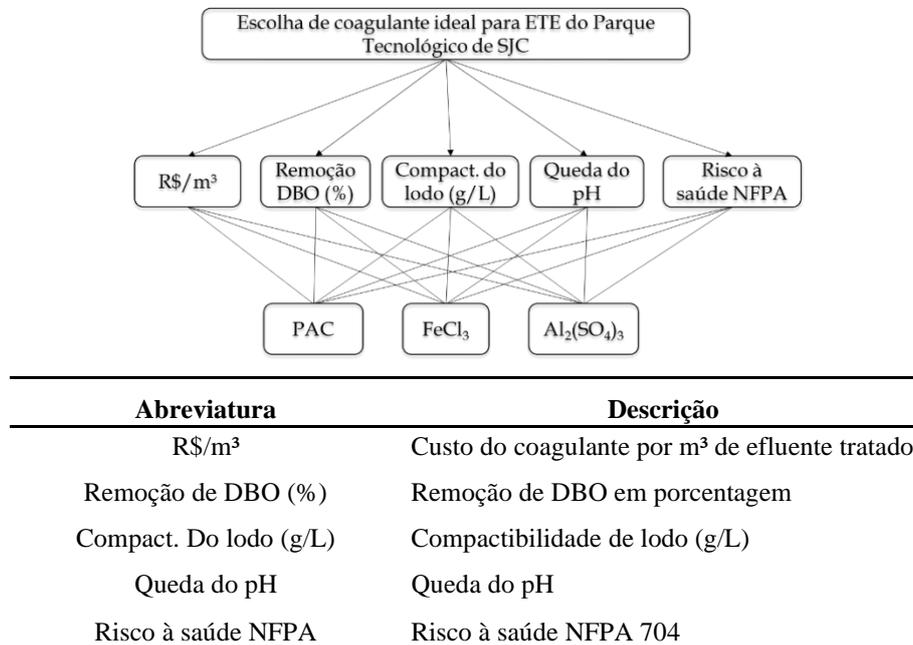


Figura 10: Estrutura hierárquica da análise multicritério.

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 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 (ABREU, 2000; FREITAS, 2006). A comparação par a par realizada se mostrou eficaz, uma vez que resultou em um valor de inconsistência total de 0,08490, que se enquadra no desejado.

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 Figura 11 apresenta os valores diretos para cada critério com os respectivos gráficos de barra dos valores normalizados. Os gráficos de barra dos dados normalizados na Figura 11 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.



Critérios	Valores Diretos			Gráfico de valores normalizados		
	A	B	C	A	B	C
	Al ₂ (SO ₄) ₃	PAC	FeCl ₃			
R\$/m ³ efluente tratado	0,42	0,39	0,51			
Remoção da DBO (%)	79	42	52			
Compactibilidade 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			

Figura 11: Dados diretos e normalizados dos critérios utilizados no método AHP.

Comparando os gráficos dos valores normalizados de cada critério na Figura 11, 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 compactibilidade 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 Figura 12 apresenta o resultado final da melhor alternativa computado pelo software. Na Figura 12, a coluna “Normal” corresponde aos valores normalizados em relação aos critérios e, a coluna “Ranking” é o ranqueamento dos coagulantes.

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

Figura 12: Ranking e resultados finais dos coagulantes obtidos pelo software.

De acordo com a síntese dos resultados finais apresentado na Figura 12, 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 (Figura 11), 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.

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, Al₂(SO₄)₃ e FeCl₃, 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 nº8468/76 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 m³ 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, L. M. DE et al. Escolha De Um Programa De Controle Da Qualidade Da Água Para Consumo Humano: Aplicação do método AHP. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, p. 257–262, 2000.
2. ADAMS, B. & CREATIVE DECISIONS FOUNDATION. SuperDecisions. Version 2.6.0 – RC1. 2016. Disponível em: <<https://superdecisions.com/downloads/>>. Acesso em: 24 maio 2017.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -. NBR 10664/89 – Águas - Determinação de resíduos (sólidos) - Método gravimétrico. 1989
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -. NBR 13736/96 – Água – Determinação de alcalinidade – Método titulométrico. 1996.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13969/97: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - 1997.
6. 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.
7. SÃO PAULO. Decreto nº 8.468 de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.
8. 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.
9. 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.
10. FERREIRA FILHO, S. S.; WAELKENS, B. E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 14, n. 3, p. 317–326, 2009.
11. 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
12. HOWE, K. J., et al. Princípios de tratamento de água. São Paulo: Cengage, 624p. 2016.
13. 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.
14. 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.
15. METCALF & EDDY, Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5ª Edição. Porto Alegre, 1980 p., 2016.
16. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA 704 - Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response. 2017.
17. 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.
18. RICHTER, C.A. Água: Métodos e Tecnologias de Tratamento. São Paulo: Blucher, 2009.
19. SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

20. SOARES, S.R.A.; BERNNARDES, R.S.; CORDEIRO NETTO, O.M.. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 18 (6) p. 1713 - 1724, Nov/Dez, 2002.
21. 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.