

**UNIVERSIDADE DE UBERABA
ANA CAROLINA DE ASSIS REIS**

**TRATAMENTO DE ÁGUA: GRADIENTE DE VELOCIDADE NA COAGULAÇÃO -
FLOCULAÇÃO**

UBERABA-MG

2017

ANA CAROLINA DE ASSIS REIS

**TRATAMNTO DE ÁGUA: GRADIENTE DE VELOCIDADE NA COAGULAÇÃO -
FLOCULAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade de Uberaba, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA-MG

2017

ANA CAROLINA DE ASSIS REIS

**TRATAMENTO DE ÁGUA: GRADIENTE DE VELOCIDADE NA COAGULAÇÃO -
FLOCULAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao
Curso de Engenharia Química da Universidade de
Uberaba, como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Área de concentração:

**Trabalho de conclusão defendido e aprovada em _____ de _____ 2017, pela
Banca Examinadora constituída pelos professores:**

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UNIVERSIDADE DE UBERABA

Prof. Ms. José Waldir de Sousa Filho

UNIVERSIDADE DE UBERABA

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”

Marthin Luther King

Dedico este trabalho à minha família, amigos, professores, orientadores e todos aqueles que me ajudaram direta e indiretamente a concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela minha vida e por senti-lo cada dia mais presente em meu amor.

À toda minha família, pela paciência e compreensão nos momentos em que estive ausente.

Em especial, aos meus pais Aparecida e João e meus irmãos Germano e Camila e minha amiga que foi de grande ajuda Stéfane.

Ao Diretor do curso de Engenharia Química, Prof. Mauro Luiz Begnini.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

Aos professores do curso de Engenharia Química que contribuíram na minha formação, sempre me incentivando e sempre prontos a ajudar.

A todos que, de alguma maneira, estiveram comigo e contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa.

E a mim mesma, por mais um desafio vencido.

RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo da coagulação e floculação usando sulfato de alumínio no tratamento de água. Na etapa da floculação, discute-se sobre coaguladores - floculadores e os gradientes de velocidades. O objetivo deste trabalho foi avaliar pH, turbidez e alcalinidade da água floculada, tanto no início como no fim do experimento, calcular os gradientes de velocidades da coagulação e da floculação no tratamento de água. Durante o estudo foi realizado ensaios no Jar-Test na Estação de Tratamento de Água na região do Triângulo Mineiro, sendo testados diferentes dosagens do coagulante. Os resultados deste estudo permitiram concluir qual o “pH ótimo” da água verifica que valores obtidos de gradientes de velocidade estão de acordo com os padrões da literatura.

Palavras-chaves: Coagulação. Floculação. Turbidez. pH. Gradientes de velocidade.

ABSTRACT

The present work consists of a study of coagulation and flocculation using aluminum sulphate in water treatment. In the flocculation stage, coagulators - flocculators and velocity gradients are discussed. The objective of this work was to evaluate pH, turbidity and alkalinity of the flocculated water, both at the beginning and at the end of the experiment, to calculate the coagulation and flocculation velocity gradients in water treatment. During the study, the Jar-Test was carried out at the Water Treatment Station in the Triângulo Mineiro region, and different dosages of the coagulant were tested. The results of this study allowed us to conclude that the "optimum pH" of water verifies that values obtained from velocity gradients are in accordance with the literature standards.

Key-words: Coagulation. Flocculation. Turbidity. pH. Speed gradients.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Mecanismos para a coagulação por adsorção-neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio	5
Figura 02: Floculador alternativo “ WalkngBeam “	9
Figura 03: Floculador de paleta de eixo vertical	10
Figura 04: Floculador de paleta de eixo horizontal.....	10
Figura 05: Floculador de paleta única de eixo vertical	11
Figura 06: Floculador de chicanas	12
Figura 07: Floculador alabama.....	12
Figura 08: Floculador de meio poroso	13
Figura 09: Aparelho de Jar-Test.....	15
Figura 10: Gradiente de velocidade	15
Figura 11: Turbidez versus pH.....	22
Figura 12: Amostras 4 e 5 respectivamente	23
Figura 13: Dimensões do jarro do Jat-Test	24
Figura 14: Número de potência.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Concentração de AL_2O_3 em função da massa específica do sulfato de alumínio líquido comercial isento de ferro	7
Tabela 02: Vantagens e desvantagens dos flocladores mecânicos	11
Tabela 03: Vantagen e desvantagens dos flocladores hidráulicos.....	13
Tabela 04: Concentração do alcalinizante e coagulante em cada jarro do Jar-Test	19
Tabela 05: Valores dos parâmetros analisados na água bruta	21
Tabela 06: Valores de turbidez e pH obtidos após Jar-Test	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1 Coagulação (Mistura Rápida).....	4
3.1.1 Coagulantes	6
3.1.2 Coagulante utilizado.....	6
3.1.2.1 Sulfato de alumínio líquido $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14,3H_2O$	6
3.1.2.2 Alcalinização	8
3.2 Floculação (Mistura Lenta)	8
3.3 Floculadores	9
3.2.1 Floculadores mecânicos	9
3.2.2 Floculadores hidráulicos.....	12
3.3 Característica físicas da água	13
3.3.1 Turbidez.....	13
3.4 Características químicas da água.....	14
3.4.1 Alcalinidade.....	14
3.4.2 Potencial hidrogeniônico - pH.....	14
3.5 Jar-Test (Teste de jarros).....	14
3.6 Gradiente de velocidade	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18

4.1 Medição de alcalinidade.....	18
4.2 Medição do pH.....	18
4.3 Jar-Test.....	18
4.3 Viscosidade.....	19
4.4 Medição da turbidez.....	20
4.6 Cálculo do gradiente de velocidade.....	20
5 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	21
5.1 Características da água bruta.....	21
5.2 Resultados do Jar-Test.....	21
5.2.1 Turbidez e pH.....	22
5.3 Cálculo do gradiente de velocidade.....	23
5.3.1 Número de potência.....	23
6 CONCLUSÃO.....	26
7 REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), embora seja indispensável ao organismo humano, a água pode conter determinadas substâncias como elementos químicos e microrganismos, que devem ser eliminados ou reduzidos para concentrações que não sejam prejudiciais à saúde humana. Com isso areia, argila e microrganismos presentes em forma de partículas suspensas, atribuem turbidez a água enquanto que substâncias húmicas conferem cor.

A coagulação é um processo que consiste na desestabilização das partículas coloidais ou neutralização das moléculas de substâncias húmicas que apresentam carga residual negativa na água. Quando duas partículas coloidais se aproximam, devido ao movimento browniano que as mantém em constante movimento, atuam sobre elas forças de atração (Forças de Van der Waals) e forças de repulsão (devido à força eletrostática ou da dupla camada elétrica), impedindo a agregação entre as partículas e a consequente formação de flocos (GEWEHR, 2012).

A escolha correta do coagulante é de fundamental importância no tratamento de águas. Os coagulantes podem ser classificados em polieletrólitos ou auxiliares de coagulação e coagulantes metálicos (MAGNAN, 2010), sendo os mais empregados os inorgânicos (sais de alumínio e ferro – sulfato de alumínio, cloreto e sulfato férrico).

A floculação corresponde à etapa em que são fornecidas as condições para facilitar o contato e a agregação das partículas previamente desestabilizadas pelo processo de coagulação, visando à formação de flocos com tamanho e massa específica que favoreçam sua remoção por sedimentação, flotação ou filtração direta. A energia fornecida para a operação de floculação pode ser oriunda de flocladores mecanizados ou hidráulicos (DI BERNARDO *et al.*, 2002).

O ensaio usando o Jar-test é um ponto de partida do trabalho, pois deve ser realizado para a verificação da concentração ótima do floclante, alcalinidade, turbidez e pH.

O pH é um fator importante para o processo de coagulação-floculação. A coagulação com sais de alumínio ou de ferro só se realiza satisfatoriamente a um determinado pH, denominado pH ótimo de coagulação, e em presença de alcalinidade em uma quantidade mínima para que ocorram as reações químicas. A faixa ótima de pH de coagulação pode variar para cada tipo de coagulante utilizado (GEWEHR, 2012).

O gradiente de velocidade e tempo de agitação, tanto da coagulação como da floculação, também influenciam o processo global coagulação-floculação. Para melhores

eficiências do processo, deve haver uma otimização do gradiente de velocidade e do tempo. Para velocidades e tempos baixos pode haver a diminuição do tamanho dos flocos formados, dificultando a sedimentação. Para velocidades e tempos muito elevados, após a formação dos flocos, pode haver a quebra parcial desses, resultando em partículas menores e retardando a sedimentação (GEWEHR, 2012).

Dessa forma, o presente trabalho tem por princípio avaliar no tratamento de águas o gradiente de velocidade na coagulação-floculação. O trabalho será apresentado em 6 capítulos: capítulo 1 apresenta brevemente o conteúdo geral do trabalho. O capítulo 2 apresentará os objetivos gerais e os objetivos específicos. O referencial teórico, capítulo 3, consiste na ênfase dos principais conceitos do trabalho. No capítulo 4 encontrar-se-á o tópico denominado materiais e métodos, responsável por descrever quais os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção e análise dos dados. O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões obtidos através da metodologia aplicada, descrita no item anterior. E, por fim, no capítulo 6 a conclusão, local dedicado ao fechamento das ideias discutidas neste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar as etapas de coagulação e floculação no tratamento de águas e calcular o gradiente de velocidade, tendo o sulfato de alumínio como coagulante.

2.2 Objetivos específicos

Descrever a etapa de coagulação, relatando o coagulante utilizado;

Descrever a etapa de floculação e os tipos de floculadores:

Calcular o gradiente de velocidade, comparando-o com padrões da literatura;

Avaliar pH, alcalinidade e turbidez da água inicial e final.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos gerais sobre as etapas de coagulação e floculação, apresentando os diversos tipos de floculadores. O parâmetro mais importante envolvido no processo de floculação é o gradiente de velocidade, usualmente calculado através da expressão deduzida por Camp & Stein.

3.1 Coagulação (Mistura Rápida)

De acordo com (RICHTER, 2009) coagulação é a alteração físico-química de partículas coloidais de uma água, caracterizada principalmente por cor e turbidez. Os coagulantes reagem com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva ou precipitado de metal do coagulante usado. Com isso, estas espécies formadas anteriormente se chocam com as impurezas da água, tornando-as desestabilizadas, através da etapa de mistura rápida, onde há o fornecimento de energia e agitação (BERNARDO E PAZ, 2010; LIBÂNIO, 2010; VIANNA, 1992).

A coagulação se inicia assim que o coagulante é adicionado na água e dura frações de segundos. Consiste basicamente numa série de interações físicas e químicas envolvendo o coagulante, a superfície das partículas e algumas substâncias químicas presentes na água, especialmente as que lhe conferem alcalinidade, e a própria água (VIANNA, 1997).

A coagulação pode ser considerada como o resultado da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da dupla camada, adsorção e neutralização de cargas, varredura e formação de pontes (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). A seguir disserta-se sobre cada um deles.

Compressão da dupla camada: a desestabilização de um colóide por um eletrólito indiferente ocorre em decorrência de interações eletrostáticas: íons de mesma carga são repelidos e íons de carga contrária são atraídos pelos colóides; quanto maior a carga do íon positivo, menor a quantidade requerida para a coagulação. A introdução de um colóide num sistema coloidal causará aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a “esfera” de influência das partículas, ocorrendo coagulação por compressão da camada difusa.

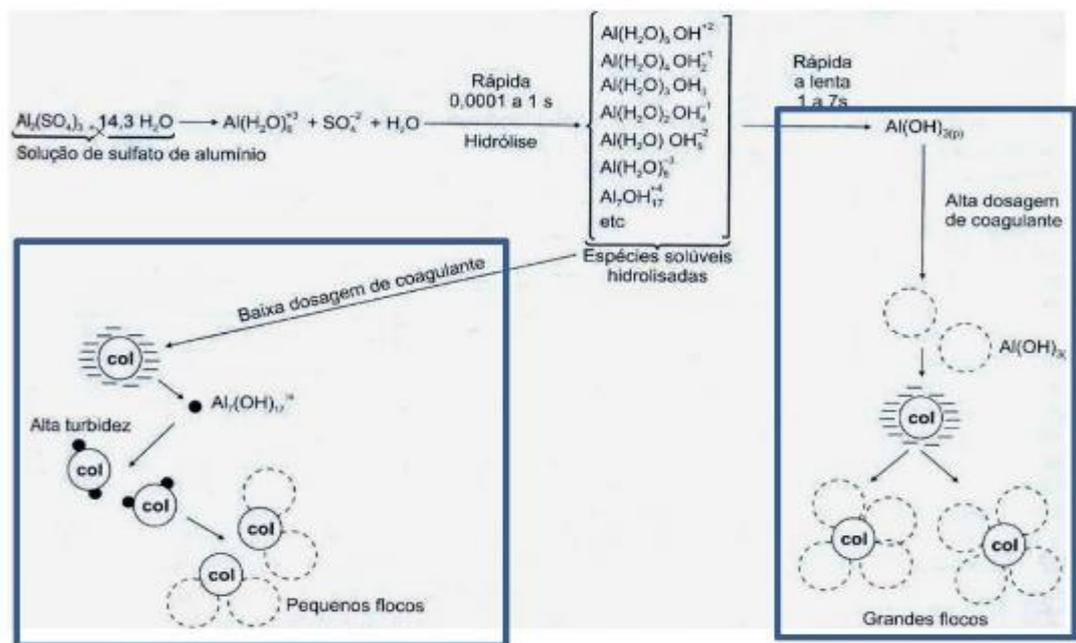
Adsorção e Neutralização de Carga: A desestabilização de uma dispersão coloidal está nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. Quando há utilização de espécies hidrolisadas de alumínio, ferro ou de polímeros sintéticos (catiônico, aniônico ou não-aniônico), a ocorrência do mecanismo de adsorção é dominante, causada pela

interação entre coagulante e colóide. Quando são utilizadas tecnologias de filtração direta, ou seja, quando não há a necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação, as partículas desestabilizadas ficam retidas no meio granular dos filtros e nesses casos, o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas torna-se muito importante.

Varredura: Em consequência da quantidade de coagulante adicionado, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitado do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou outro dependendo do coagulante utilizado. Nesse mecanismo, há a formação de flocos maiores e a velocidade de sedimentação é alta. Assim, este mecanismo é o mais utilizado em estações de tratamento de água nas quais há floculação e sedimentação antecedendo a filtração rápida. Segundo Amirtharajah & Mills (1982), os mecanismos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas e por varredura, quando é utilizado o sulfato de alumínio, podem ocorrer segundo os mecanismos indicados na Figura 1.

Adsorção e Formação de Pontes: Com o objetivo de reduzir as dosagens do coagulante, conferir ao flocos maior massa específica, aumentar a resistência do flocos entre outros, este mecanismo caracteriza-se por envolver o uso de polímeros orgânicos naturais ou sintéticos, usualmente como auxiliares de floculação. Tais compostos podem ser definidos como uma série repetida de unidades químicas (monômeros) unidas por ligações covalentes.

Figura 1: Mecanismos para a coagulação por adsorção-neutralização de carga e por varredura utilizando sulfato de alumínio (na figura col significa coloide)



Fonte: DI BERNARDO E DANTAS, 2005.

3.1.1 Coagulantes

Ao adicionar determinados produtos químicos à água, após um período de tempo, ela se torna mais límpida. Atualmente sabe-se que os parâmetros de cor e turbidez melhoravam devido à precipitação de coágulos, formados a partir da ionização desses produtos após o contato com a água (BORBA, 2001).

Os coagulantes são produtos naturais ou químicos usados no tratamento de águas e efluentes, sua função é neutralizar as cargas negativas das partículas em suspensão, possibilitando a aglomeração dessas partículas, formando assim os flocos. Os coagulantes mais comuns são:

- Sulfato de Alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$): obtido pelo ataque do ácido sulfúrico à bauxita pulverizada, pode ser comercializado na forma sólida (em torno de 17% de alumina) ou em solução (em torno de 8% de alumina);
- Sulfato Ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): subproduto de diversos processamentos químicos e da decapagem do aço, usado em águas fortemente alcalinas;
- Sulfato Férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ou $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$): particularmente indicado para remover cor em pH reduzido;
- Cloreto Férrico (FeCl_3 ou $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$): tem uso muito limitado por ser muito corrosivo.

3.1.2 Coagulante utilizado

3.1.2.1 Sulfato de alumínio líquido $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$

O produto comercial líquido é geralmente fornecido por meio de caminhão-tanque e armazenado em tanques de resina. Em função da massa específica da solução comercial, tem-se os valores da porcentagem de sulfato de alumínio; Al_2O_3 (massa por massa) e a concentração de sulfato de alumínio disponível no produto comercial, conforme a Tabela 1. A acidez máxima da solução é de 0,5% (massa por massa).

Tabela 1: Concentração de Al_2O_3 em função da massa específica do sulfato de alumínio líquido comercial isento de ferro

Massa específica do produto comercial (Kg/L)	Concentração de sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ no produto comercial (% massa)	Concentração de Al_2O_3 no produto comercial (% massa)	Concentração de sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ no produto comercial (g/L)
1,3016	44,81	7,62	582,42
1,3028	44,92	7,64	582,42
1,3040	45,10	7,67	587,21
1,3051	45,22	7,69	589,61
1,3063	45,39	7,72	592,00
1,3075	45,57	7,75	595,60
1,3087	45,75	7,78	598,00
1,3098	45,86	7,80	600,39
1,3110	46,04	7,83	302,79
1,3122	46,22	7,86	606,39
1,3134	46,33	7,88	607,59
1,3146	46,51	7,91	611,18
1,3158	46,69	7,94	613,58
1,3170	46,80	7,96	615,98
1,3182	46,98	7,99	618,37
1,3194	47,17	8,02	621,97
1,3206	47,28	8,04	624,37
1,3218	47,45	8,07	626,76
1,3230	47,63	8,10	629,16
1,3242	47,75	8,12	631,56
1,3254	47,92	8,15	635,49
1,3266	48,10	8,18	637,55
1,3278	48,22	8,20	639,94
1,3290	48,39	8,23	642,34
1,3303	48,57	8,26	645,93

Fonte: DI BERNARDO E DANTAS, 2005.

3.1.2.2 Alcalinização

No caso da alcalinidade natural da água não ser suficiente para reagir com a quantidade requerida do coagulante, torna-se necessário a adição de reagente alcalinizante.

Os principais alcalinizantes são:

- Cal hidratada (Hidróxido de Cálcio – Ca(OH)_2): o mais utilizado;
- Barrilha (Carbonato de Sódio) – Na_2CO_3): altamente solúvel e de fácil manipulação.
- Soda Cáustica (Hidróxido de Sódio – NaOH): deve ser manuseada com cuidado por ser extremamente cáustica.

3.2 Floculação (Mistura Lenta)

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a floculação deve ser efetuada com agitação relativamente suave, para que ocorram choques entre as partículas e que elas se aglomerem formando partículas maiores, os flocos.

A floculação se caracteriza por uma etapa de clarificação, constituída por um conjunto de atividades físicas, nas quais se objetiva reduzir o número de partículas suspensas e coloidais presentes na massa líquida, buscando a formação de flocos mais robustos que serão extraídos com mais facilidade posteriormente (LIBÂNIO, 2010).

A floculação consiste em impor um período de agitação lenta a água, procurando maximizar a agregação e minimizar a ruptura dos flocos. As variáveis mais importantes são: concentração de coagulante, pH, número e características das partículas primárias presentes na água, gradiente de velocidade e tempo de agitação (TEIXEIRA, 2003).

Na etapa de floculação faz-se distinção entre floculação pericínética e ortocínética. Em geral todas as partículas estão submetidas a esses dois tipos de floculação, porém, para partículas pequenas predomina o movimento browniano, e portanto, a floculação pericínética. Nesse caso, as moléculas de água, devido a energia térmica, proporcionam movimentos erráticos das partículas, favorecendo a colisão entre as mesmas.

Por outro lado, para partículas maiores, a floculação ortocínética, criada pelas diferenças de velocidades dentro do líquido, tanto em regime laminar como no turbulento, é a que tem maior importância (SENDER, 1981). De acordo com Dharmappa et al. (1993), é de

extrema importância a distribuição do tamanho das partículas primárias na otimização da floculação.

3.3 Floculadores

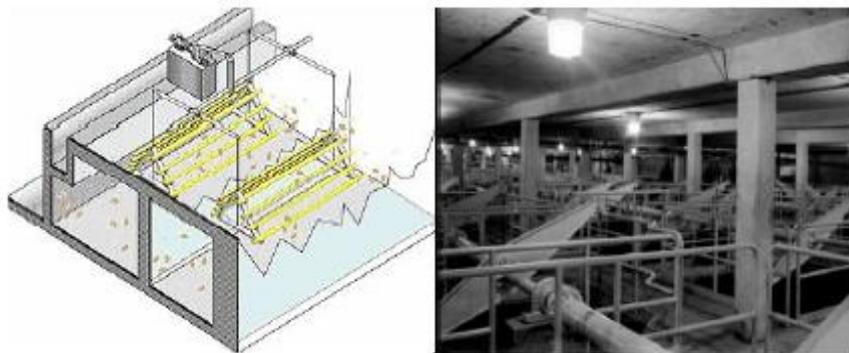
Os sistemas de floculação podem ser classificados de forma simplificada em mecânicos e hidráulicos. De uma maneira mais ampla podem ser divididos em floculadores de potência ou de dissipação (hidráulico, mecânico ou pneumático) e floculadores de contato em manta de lodo.

3.2.1 Floculadores mecânicos

Os floculadores mecânicos distinguem-se basicamente, pelo tipo de movimento, em alternativos e giratórios. No Brasil, os tipos mais utilizados são os que utilizam paletas, que giram em torno de um eixo e os que empregam turbinas ou hélices.

- Floculadores alternativos: apresentam dois tipos básicos conhecidos por “WalkingBeam” (velocidade angular constante - Figura 2) e “RibbonFlocculator” (velocidade angular de uma função senoidal) que, são constituídos por um sistema de paletas ou de fitas que se deslocam alternativamente de cima para baixo e vice-versa, produzindo correntes turbilhonares na massa líquida, (RITCHER, 2009);

Figura 2: Floculador alternativo “WalkingBeam”



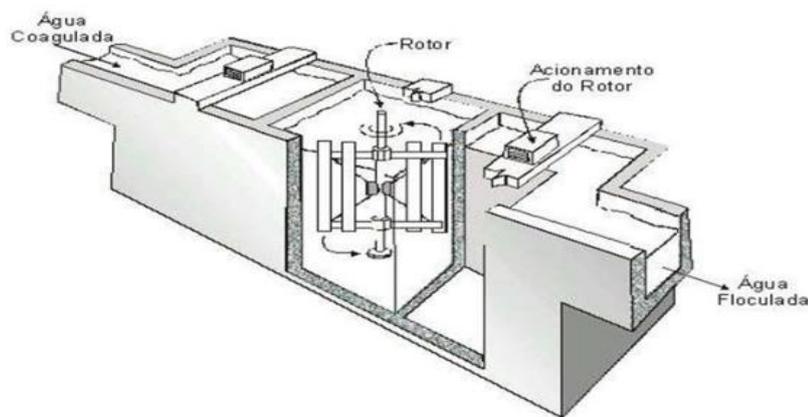
Fonte: Sabogal Paz (2007).

- Floculadores giratórios: de eixo vertical com paletas que operam a baixas velocidades de rotação ou com turbinas que operam com velocidades relativamente altas.

Os flocculadores mecanizados (paletas) se dividem de acordo com a sua forma de construção:

- Flocculadores de paleta de eixo vertical: A água coagulada é introduzida numa série de câmaras (Figura 3). Na primeira delas, o grau de agitação (gradiente de velocidade) é mais intenso que na segunda. Por sua vez, o grau de agitação na segunda câmara é mais intenso que na terceira. O gradiente de velocidade depende da rotação do eixo e das características da paleta: altura, espessura e espaçamento, entre outras.

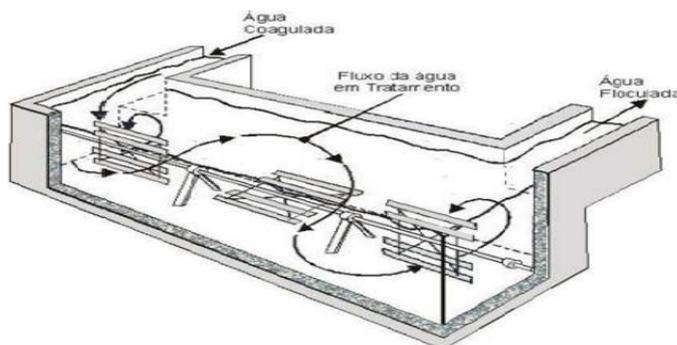
Figura 3: Flocculador de paleta de eixo vertical, eixos movimentados por conjuntos motor redutor, instalados sobre as passarelas do flocculador.



Fonte: Saneago

- Flocculadores de paletas de eixo horizontal: A água coagulada é introduzida numa série de câmaras (Figura 4). Tomando uma câmara como objeto de estudo, observa-se que, o gradiente de velocidade dessa câmara será mais intenso que o das câmaras posteriores e menos intenso que o das câmaras anteriores.

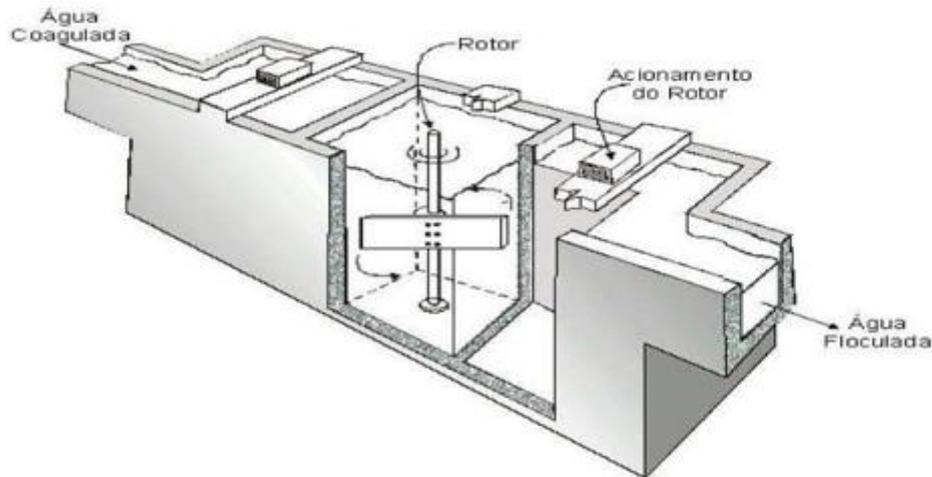
Figura 4: Flocculador de paletas de eixo horizontal, eixos movimentados por conjuntos motor redutor, normalmente instalados no interior de poços secos.



Fonte: Saneago

- Floculadores de paleta única, de eixo vertical: A água coagulada é introduzida numa série de câmaras, na primeira delas, o gradiente de velocidade é mais intenso que na segunda, que por sua vez, possui um gradiente mais intenso que o apresentado na terceira (Figura 5).

Figura 5: Floculador de paleta única de eixo vertical, eixos movimentados por conjuntos motor redutor, instalados sobre as passarelas do floculador



Fonte: Saneago

Vantagens e desvantagens dos floculadores mecânicos

A Tabela 2 resume as principais vantagens e desvantagens dos floculadores mecânicos.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens dos floculadores mecânicos.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> - Formação de flocos densos; - Possibilidade de mudança da velocidade de agitação de acordo com a necessidade de tratamento; - Agitação constante e homogênea. 	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de curto-circuito ou zonas mortas; - Dependência de equipamentos; - Consumo de energia elétrica; - Necessidade de manutenção eletro-mecânica.

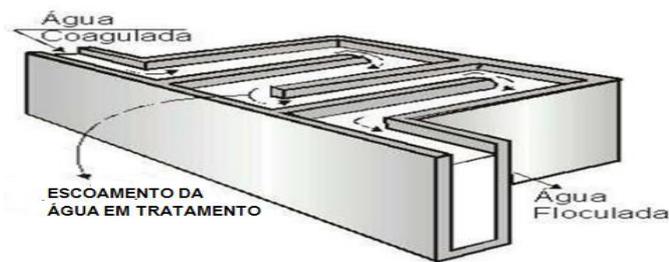
Fonte: Autor, 2017.

3.2.2 Floculadores hidráulicos

Segundo Richter (2009), os primeiros floculadores utilizados em tratamento de água foram tipo canais, onde se aproveitava a energia hidráulica no movimento da água para a floculação. Assim, qualquer dispositivo que utilize a energia hidráulica dissipada no escoamento da água através de um tanque, canal ou canalização pode constituir um floculador hidráulico. Os floculadores hidráulicos mais utilizados são os de chicanas, de escoamento horizontal ou vertical.

- Floculador de chicanas: A energia necessária para promover a floculação em canais em chicanas, decorre da perda de cargas nos retornos (Figura 6). Dependendo do sentido do escoamento, divide-se em: *horizontais*: o escoamento vai e vem girando 180° na horizontal ao final de cada chicana e *verticais*: o escoamento sobe e desce 90° na vertical ao final de cada chicana.

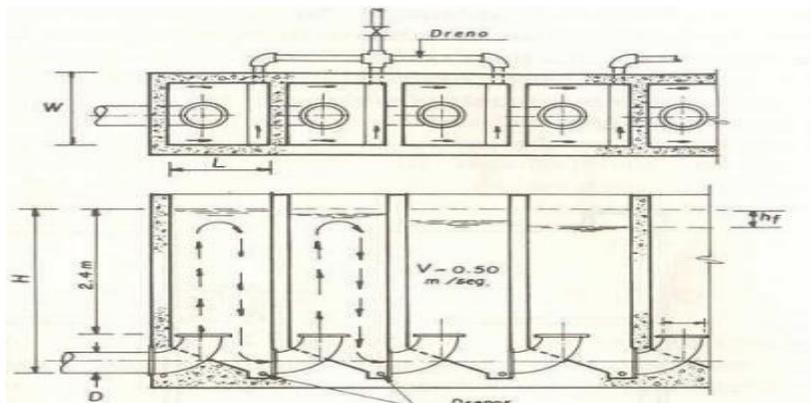
Figura 6: Floculador de chicanas



Fonte: Saneago

- Floculador Alabama: O floculador tipo Alabama é constituído por compartimentos interligados pela parte inferior através de curvas de 90° voltadas para cima (Figura 7). O escoamento pode ser ascendente e descendente no interior do mesmo compartimento.

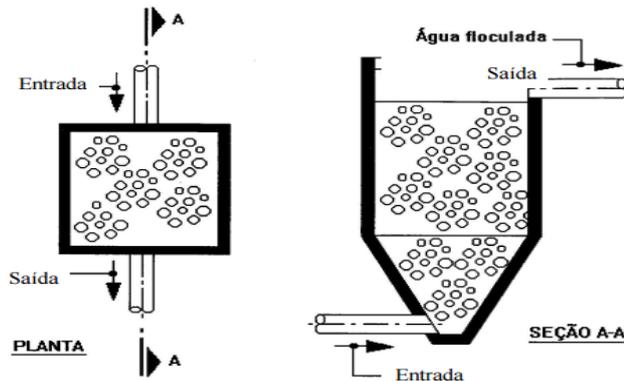
Figura 7: Floculador alabama



Fonte: Richter e Netto (1991).

- Floculadores de Meio.Poroso: consiste na passagem da suspensão após adição do polímero floculante através de um meio granular contido em um tanque (escoamento vertical), figura 8 ou canal (escoamento horizontal).

Figura 8: Floculador de meio poroso



Fonte: Richter e Netto (1991).

Vantagens e desvantagens dos floculadores hidráulicos

A Tabela 3 resume as principais vantagens e desvantagens dos floculadores hidráulicos.

Tabela 3: Principais vantagens e desvantagens dos floculadores hidráulicos.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"> - Escoamento próximo ao pistonado; - Não requer equipamentos; - Não consome energia elétrica; - Ideal para instalações de pequeno porte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não há flexibilidade na alteração do G: - Normalmente ocupa um grande espaço.

Fonte: Autor, 2017.

3.3 Característica físicas da água

3.3.1 Turbidez

É uma característica da água devido á presença de partículas suspensas, com tamanho variando desde suspensões grosseiras á coloides. A presença dessas substâncias provoca a

dispersão e a absorção da luz, dando a água uma aparência nebulosa. Pode ser causada por partículas de argila ou lodo, descarga de esgoto doméstico ou industrial ou até mesmo microrganismos.

3.4 Características químicas da água

3.4.1 Alcalinidade

A alcalinidade da água é representada pela presença de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato, é importante o conhecimento das concentrações destes íons, pois permite a definição de dosagens dos agentes flocculantes. Os íons causadores da alcalinidade têm características básicas, sendo assim reagem com soluções ácidas ocorrendo a neutralização. A alcalinidade em função do pH para temperatura equivalente a 25°C e pressão de 1 atm, pode ser dividido nas seguintes faixas:

pH > 9,4 hidróxidos e carbonatos

9,4 < pH < 8,3 carbonatos e bicarbonatos

8,4 < pH < 7,4 apenas bicarbonatos

3.4.2 Potencial hidrogeniônico - pH

O pH traduz a acidez ou alcalinidade da água, representada pela concentração de íons H⁺ dissolvidos na água. Segundo Bernardo e Paz (2010), o pH é fundamental para que os processos de coagulação, floculação, filtração e desinfecção ocorram eficientemente, sendo monitorado em todo o processo de tratamento. Além disso, o controle de pH na saída do tratamento tem a finalidade de conservar as redes de distribuição contra corrosões ou incrustações (LIBÂNIO, 2010).

3.5 Jar-Test (Teste de jarros)

Equipamento composto de seis jarros com capacidade de dois litros cada, contendo pás ou agitadores em seu interior que são acionados através de mecanismos magnéticos, e que servem para otimizar a mistura dentro de cada jarro (Figura 9).

Figura 9: Aparelho de Jar Test



Fonte: Autor, 2017

A dosagem ideal de produtos químicos empregados em tratamento de água ou esgoto normalmente é obtida por meio de ensaios de laboratório denominados teste de jarros ou Jar-Test. Este tipo de teste não só é utilizado para determinação de dosagens de químicos em estações de tratamento já ativas como para determinação de parâmetros básicos na elaboração de projetos de estações de tratamento (SILVA; LAURIA, 2006).

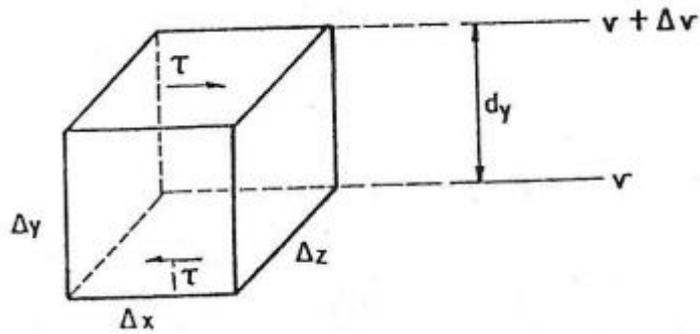
Com estes ensaios determinam-se condições ótimas de floculação, podendo trabalhar não só nas concentrações, mas também no tempo de residência e na velocidade de agitação do processo. Para estas determinações se estabelece um volume de efluente e varia-se a quantidade de produtos químicos a serem adicionados. Este sistema é colocado sob agitação (normalmente é escolhida a rotação desta agitação) por um período determinado e, após este tempo, o sistema é deixado em repouso para que ocorra decantação.

3.6 Gradiente de velocidade

Segundo Camp e Stein (1943), os gradientes de velocidades variam consideravelmente no interior de uma câmara de mistura. Porém, sob condições estáveis de trabalho fornecido por unidade de volume na água da câmara e por unidade de tempo, definiu-se o parâmetro de gradiente de velocidade, dado pela dedução a seguir.

Considere-se um elemento de fluido $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ (Figura 10) submetida a uma agitação hidráulica ou mecânica, a potência dissipada é dada pela equação 1.

Figura 10: Gradiente de velocidade



Fonte: RICHTER & AZEVEDO NETTO (1991).

$$P = \text{tensão de cisalhamento } (\tau) \times \text{área } (\Delta X \Delta Z) \times \text{velocidade } (\Delta V) \quad (1)$$

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v$$

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \cdot \left(\frac{\Delta Y}{\Delta Y}\right) \quad (2)$$

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)$$

$$P = \tau \cdot V \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)$$

Sendo τ , para fluídos Newtonianos:

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) \quad (3)$$

Substituindo:

$$P = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) \cdot V \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)$$

$$P V = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right)^2$$

Considerando, $\left(\frac{\Delta v}{\Delta Y}\right) = G$, temos:

$$G = \sqrt{\frac{Pot}{\mu \times Vol}} \quad (4)$$

Onde:

G: é o gradiente de velocidade (s^{-1});

P: é a potência útil introduzida no sistema (W; N m/s);

V: é o volume útil (m^3);

μ : é a viscosidade absoluta do fluido ($N.s/m^2$; $Pa.s$).

Este passou a ser adotado como parâmetro usual de projeto de unidades de floculação e mistura rápida sendo a parte central de uma unidade de tratamento de água. No sistema de tratamento de água são aplicados dois diferentes tipos de agitação: na floculação, cujo objetivo é promover o contato entre as partículas e a agitação para misturar uniformemente os produtos químicos na água que ocorre na etapa de coagulação, operação que requer uma agitação intensa (MWH,2005).

Segundo a NBR 12216 (norma que define os projetos de tratamento de água para abastecimento) o gradiente de velocidade da coagulação compreendidos entre $10 s^{-1}$ e $700 s^{-1}$ e da floculação deve estar entre $10s^{-1}$ e $70 s^{-1}$.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio de um laboratório de físico-química de uma ETA, na região do Triângulo Mineiro, sendo realizadas algumas análises no laboratório da Universidade de Uberaba.

4.1 Medição de alcalinidade

Material

- Erlenmeyer de 250 ml
- Proveta de 100 ml
- Bureta de 50 ml
- Béquer de 50 ml
- Pipeta

Reagentes

- Ácido sulfúrico 0,02N
- Solução indicadora de fenolftaleína
- Solução indicadora de metilorange

Procedimentos

Pipetou-se 10 ml da amostra de água e transferiu-se para um erlenmeyer, em seguida, adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína. Como a solução continuou incolor foi adicionada 3 gotas de metilorange.

4.2 Medição do pH

A determinação do pH ocorreu através de um phmetro de bancada modelo Gehaka.

4.3 Jar-Test

Reagentes

- Sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ - Concentração 645,93 g/L (valor cedido pela ETA)

- Hidróxido de Cálcio Ca(OH)_2

Procedimentos

O primeiro passo após a coleta da amostra é a verificação de sua qualidade através das análises iniciais de pH, alcalinidade, turbidez e cor. Que servem de parâmetros para posterior comparação e conclusão do ensaio.

A proporção utilizada de coagulante e alcalinizante é de 2:1 respectivamente. Como cada jarro contém um volume de 2 L cada, colocou-se concentrações diferentes em cada um de coagulante, conforme mostra a tabela 4:

Tabela 4: Concentrações de alcalinizante e coagulante em cada jarro do Jar Test

Alcalinizante/Coagulante	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Concentração de Ca(OH)_2 (mg/L)	0,03 ml	0,06 ml	0,09 ml	0,13 ml	0,15 ml	0,19 ml
Concentração de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ (mg/L)	0,06 ml	0,12 ml	0,18 ml	0,26 ml	0,30 ml	0,38 ml

Fonte: Autor, 2017.

Após colocar 2 litros de água em cada jarro do Jar Test, foram adicionados o alcalinizante e o coagulante simultaneamente, submetendo a mistura a uma rotação máxima de 100 rpm durante 60 segundos, o que caracteriza a simulação de mistura rápida da Calha de Parshall (dispositivo de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizadas). Em seguida, reduziu-se a rotação para 30 rpm durante um intervalo de 30 minutos, o que se refere ao processo de floculação. Após o intervalo de 15 minutos analisou-se a turbidez e o pH.

4.3 Viscosidade

Materiais

- Buretas 50 ml
- Suportes universais
- Viscosímetro de Ostwald
- Cronômetro
- Pipetas 5 ml

- Termômetros

Procedimentos

O viscosímetro assim como todo material empregado no manuseio dos fluidos deve estar completamente limpo; monitorou-se a temperatura indicada durante a medida, por meio de banho térmico (20°C). Após utilizou-se a pipeta para carregar o viscosímetro, introduzindo a água floculada (aproximadamente 10 ml) pelo extremo aberto de maior diâmetro. Em seguida deixou-se que o fluido escoasse, e disparou-se o cronômetro quando o nível superior do fluido passou pelo anel “A” e travou-se o cronômetro quando o nível superior do fluido passou pelo anel “B”. Essa medição foi feita três vezes.

4.4 Medição da turbidez

Após a calibração do turbidímetro no início do experimento não há necessidade de novas calibrações, desde que se mantenha ele ligado. Deve-se ter um cuidado especial com a cubeta, pois se ela estiver suja, haverá interferência nos resultados.

4.6 Cálculo do gradiente de velocidade

Para o cálculo do gradiente de velocidade necessitou-se a obtenção da potência, através do número de potência, da viscosidade do líquido após a etapa de floculação, e o volume de água. Para isso foi usada a equação geral de Camp & Stein.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Características da água bruta

O teste de Jar-test foi realizado com a água cujas características iniciais estão descritas na Tabela 5.

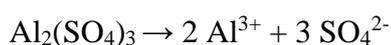
Tabela 5: Valores dos parâmetros analisados na água bruta

Alcalinidade (ppm)	pH	Turbidez (NTU)
32,475	7,83	11,4

Pode-se perceber que a turbidez está muito baixa, sendo assim a água já estava bem clara quase incolor, não justificando assim uma análise de cor. Ao final do experimento a alcalinidade encontrada foi de 12,75 ppm.

5.2 Resultados do Jar-Test

O sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), é obtido por meio da reação química entre o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4), este é adicionado à água com o óxido de cálcio (CaO). Sendo assim quando essas duas substâncias misturam-se na água, ocorre uma transformação química que forma uma substância gelatinosa, o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$). Essa transformação química ocorre porque, em meio aquoso, o sulfato de alumínio gera os seguintes íons:



Os íons Al^{3+} passam a atuar de duas formas:

- A minoria desses cátions neutraliza as cargas negativas das impurezas presentes na água;
- A maioria desses cátions interage com os íons hidroxila (OH^-) da água, formando o hidróxido de alumínio.



O $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado, se apresenta primeiramente sob forma coloidal, em porções pequenas que se agregam formando os flocos. Com isso há um pH em que melhor se dá essa união e conseqüente melhor floculação que é denominado de “pH ótimo de floculação”, que

está na faixa de 6,8. Sendo assim dentro das concentrações utilizadas nos testes de Jar-Test, observou-se que a melhor faixa para aplicação do coagulante está entre 80 mg/L a 100 mg/L

5.2.1 Turbidez e pH

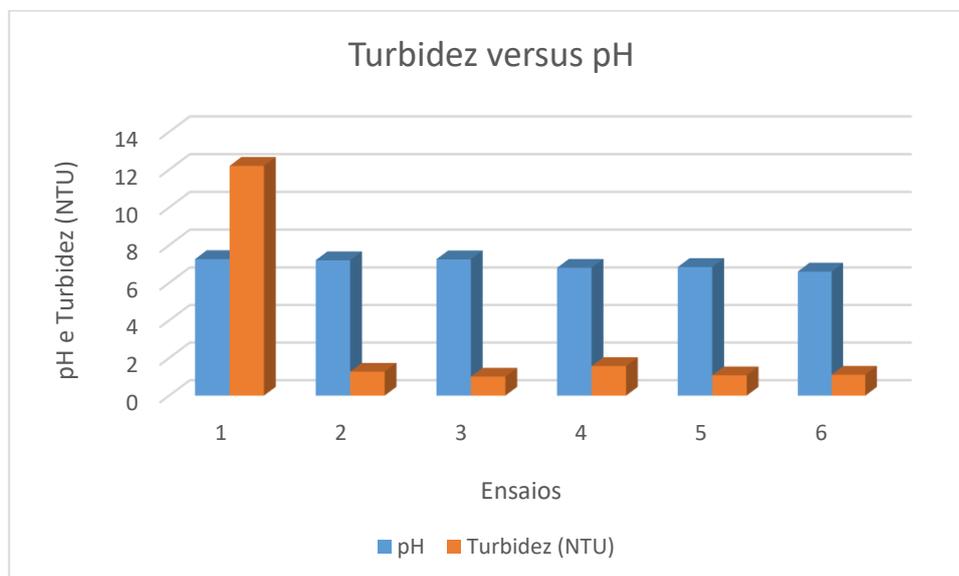
Com base nos procedimentos e análises realizados no laboratório, a Tabela 6 e Figura 11 mostram os resultados que foram obtidos de turbidez e pH:

Tabela 6: Valores de turbidez e pH obtidos no Jar test

Amostra	Turbidez (NTU)	pH
1	12,2	7,26
2	1,27	7,2
3	1,01	7,25
4	1,57	6,8
5	1,08	6,84
6	1,11	6,6

Fonte: Autor, 2017.

Figura 11: Turbidez versus pH

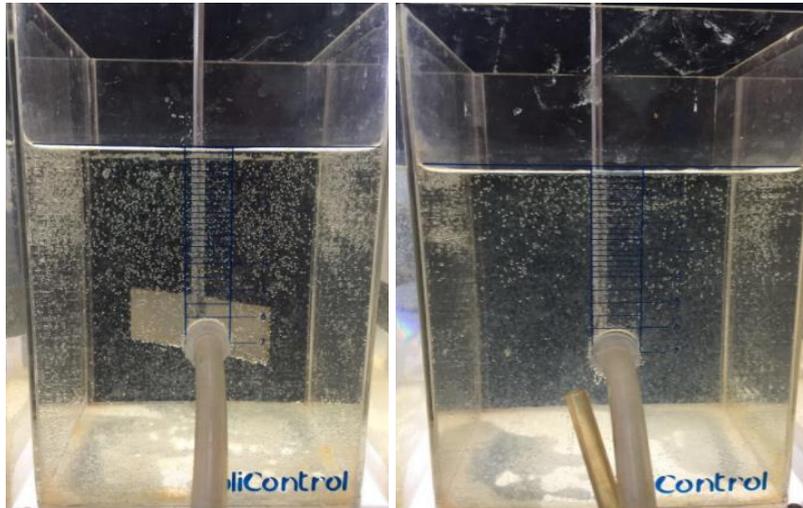


Fonte: Autor, 2017.

Ao observar os resultados da turbidez pode-se notar que com exceção da amostra 1, todas as outras apresentam valores de turbidez excelente, pois são menores que 5 NTU (Nefelometric Turbidity Unit), ver Figura 11.

Em relação ao pH todos os valores obtidos apresentam valores perto da faixa de neutralidade, sendo as amostras 4 e 5 (Figura 12) as que mostram resultados mais eficientes devido estar na faixa do pH indicado como “ótimo” para o uso de sulfato de alumínio.

Figura 12: Amostras 4 e 5 respectivamente.



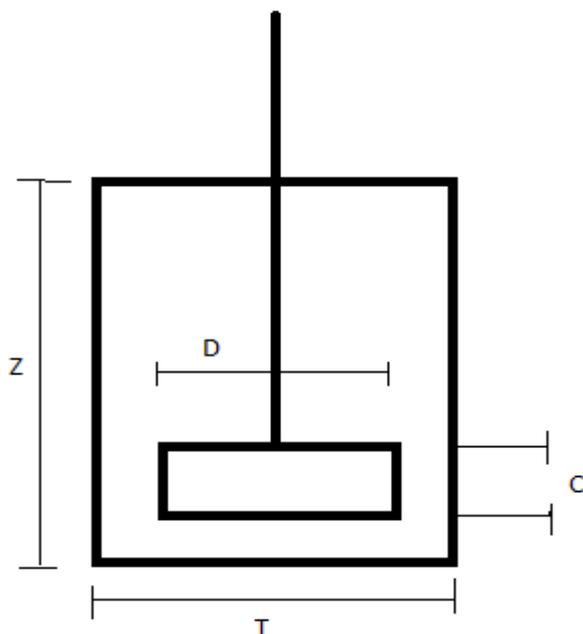
Fonte: Autor, 2017

5.3 Cálculo do gradiente de velocidade

5.3.1 Número de potência

Configurações e dimensões características do jarro (Jar-Test) padrão, Figura 13.

Figura 13: Dimensões do jarro



$$\left(\frac{C}{T}\right) = \left(\frac{0,5}{2,0}\right) = 0,25$$

$$\left(\frac{Z}{T}\right) = 1$$

$$\left(\frac{D}{T}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) = 0,5$$

Onde:

C: medida a partir do vaso, base para o ponto mais baixo do impulsor, m;

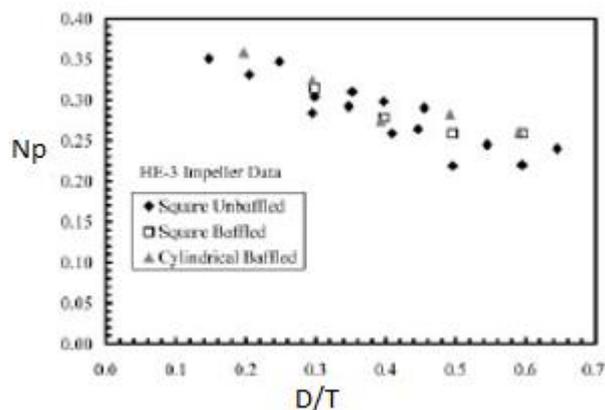
D: diâmetro, m;

T: diâmetro do tanque, m;

Z: altura do vaso, m.

Assim analisando a Figura 14 abaixo, encontra-se o número de potência que será utilizado para encontrar o valor da potência dissipada e, obter o gradiente de velocidade.

Figura 14: Número de potência



Autor: MITCHELL, 2008.

Potência utilizada na coagulação e em seguida o gradiente de velocidade da mesma com um $T = 60$ s.

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

$$P = 0,25 \cdot (997 \text{ Kg/m}^3) \cdot \left(\frac{100 \text{ rpm}}{60 \text{ s}}\right)^3 \cdot (0,075 \text{ m})^5$$

$$P = 7,5982 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Onde:

P: potência, W;

Np: número de potência;

ρ: densidade da água 25°C, Kg/m³

N: número de rotações por segundo, rps;

D: diâmetro do rotor real do vaso do Jar-Test, m.

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{7,5982 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{0,0008661 \cdot 0,002 \text{ m}^3}}$$

$$G = \sim 67 \text{ s}^{-1}$$

Pode-se observar que o gradiente de velocidade da coagulação foi baixo, mas ficou dentro do das normas, que está entre 10 s⁻¹ a 700 s⁻¹.

Potência utilizada na floculação e em seguida o gradiente de velocidade da mesma com um T = 30 min.

$$P = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

$$P = 0,25 \cdot (997 \text{ Kg/m}^3) \cdot \left(\frac{30 \text{ rpm}}{60 \text{ s}}\right)^3 \cdot (0,075 \text{ m})^5$$

$$P = 7,3935 \cdot 10^{-5} \text{ W}$$

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{7,3935 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{0,0008661 \cdot 0,002 \text{ m}^3}}$$

$$G = \sim 7 \text{ s}^{-1}$$

Já o gradiente de velocidade da floculação ficou abaixo do padrão, mas foi pouco, sendo o mínimo de 10 s⁻¹ e máximo de 70 s⁻¹. Contudo, para baixa turbidez o grau de intensidade é menor, e são mais difíceis de flocular que em águas de turbidez mediana a elevada (RICHTER, 2009).

6 CONCLUSÃO

Após feita as análises no Jar-Test pode-se concluir que, a concentração de sulfato de alumínio ótima tecnicamente que foram empregados em cada jarro, ocorreu a remoção da turbidez, mesmo a inicial antes dos testes ser pequena, ela manteve-se dentro do padrão de potabilidade que é de < 5 NTU. Os melhores resultados de pH foram com as amostras 4 e 5, com concentrações de coagulante entre 80 mg/L e 100 mg/L, respectivamente. Considerando que o “pH ótimo” tecnicamente se encontra na amostra 4 no valor de 6,8.

Comparando o gradiente de velocidade da coagulação na prática com os padrões da literatura que é de 10 s^{-1} a 700 s^{-1} , tem-se um resultado de 67 s^{-1} , que apesar de ser baixo para uma mistura rápida está dentro dos padrões. No gradiente de velocidade da floculação nota-se que está abaixo do esperado, mas próximo do valor mínimo que é de 10 s^{-1} e 70 s^{-1} . Contudo, para baixa turbidez o grau de intensidade é menor, e são mais difíceis de flocular que em águas de turbidez mediana a elevada.

7 REFERÊNCIAS

- AMIRTHARAJH, A. (1989). **Tecnologias para tratamento de águas de abastecimento** – The mechanisms of coagulation. 20p., Jul. AMIRTHARAJH, A. & MILLS, K. M. (1982). “**Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation**”. J. AWWA, V. 74, n. 4, p. 210-216, Apr.
- BERNARDO, L. DI; PAZ, L. P. S. Seleção de tecnologias de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2010. p. 868.
- BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da moringa oleifera lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. 2001. 76f. Dissertação (Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa. 2001.
- CAMP, T.R., STEIN, P.C.. Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion. **Journal of the Boston Society Of Civil Engineers**, v. 30, n.4, p. 219-237, Oct, 1943.
- DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE**. 2008. Disponível em: < <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/determinacao-da-alcalinidade/>>. Acesso em: 05 de abril de 2017.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: RIMA, 2ª ed., 2.v, p.1565, 2005.
- DHARMAPPA, H. B.; VERNK, J.; FUJIWARA, O.; VIGNESWARAN, S. **Optimal design of a flocculator**. Wter Research. V.27, .3, p. 513-519, 1993.
- FOGAÇA, Jennifer R. V. **SEPARAÇÃO DE MISTURAS: FLOCULAÇÃO**. Disponível em: < <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/floculacao.htm> >. Acesso em: 12 de junho de 2017.
- GEWEHR, A. G. **Tratamento por coagulação-floculação de lixiviado bruto de aterro sanitário com e sem pré-tratamento biológico em reator sequencial em batelada**. 2012. 163 f. Dissertação (Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/62110/000868118.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 07 junho de 2017.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3º Edição. Campinas: Editora Átomo, p. 444, 2010.

NBR 12216/92. **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro – RJ. 1992. 18 p.

MAGNAN, R. B. - **Análise da viabilidade técnica e financeira da substituição do coagulante cloreto férrico por policloreto de alumínio durante o processo físico-químico no tratamento de efluente de abatedouro avícola** - Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental - Universidade de Passo Fundo – Passo Fundo, MG, 2010.

MITCHELL, Emily T.; MYERS, Kevin J. **Solids suspension agitation in square tanks**: The Canadian Journal of chemical engineering, February, 2008. Volume 86.

MWH. **Water Treatment Principles and Design**. 2ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

Pelissari, Leticia Medeiros Tagarro; **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do floculador Tubular Helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento**; autora; Espírito Santo; 2006.

QGS Química – disponível em: www.qgsquimica.com.br – Acesso em: 07 de junho de 2017.

SILVA, C. N.F.; LAURIA, R.G. - **Estudo da viabilidade técnica e econômica da substituição do sulfato de alumínio pelo cloreto férrico ou sulfato férrico no tratamento de água de abastecimento** - Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, Faculdades Unificadas da Fundação Educacional de Barretos – Barretos, SP, 2006.

RICHTER, C. A., AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

RICHER C. A. **Água: Métodos e tecnologia de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, p. 91, 2009.

Santos, A. B. dos; Matsumoto, T; **Aplicação de polieletrólito em floculador de manta de lodo na remoção de cor no tratamento de águas superficiais**; XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; Cancun, México, 27 a 31 de octubre, 2002

SENDER, I. H. **Estudio experimental en un floculator de lecho granular**. Santiago: Departamento de Ingenieria Civil da Faculdade de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade do Chile, 1981. 1v. Memória para optar al título de Ingeniero Civil.

TEIXEIRA, Priscila da Cunha. **Emprego da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavagem de veículos visando a reciclagem da água**. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. Campinas 2003.

TURBIDEZ. Disponível em: < <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/turb.htm>>. Acesso em: 05 de abril de 2017.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada, p. 344, 1992.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3ª ed. São Paulo: Imprimatur Artes Ltda, 1997. Lv.

