

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LEANDRO DA SILVA PEDRO

**ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO SEDIMENTAÇÃO EM ÁGUA DE AÇUDE
UTILIZANDO POLICLORETO DE ALUMÍNIO**

Natal

2016

LEANDRO DA SILVA PEDRO

**ENSAIOS DE FLOCULAÇÃO SEDIMENTAÇÃO EM ÁGUA DE AÇUDE
UTILIZANDO POLICLORETO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade
Federal do Rio Grande do Norte
como requisito parcial para a
obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química sob a
orientação da Professora Magna
Angélica dos Santos Bezerra
Sousa.

Natal

2016

DEDICATÓRIA

A atividade científica, vista pelo lado de fora, pode parecer fria e desenvolvida por indivíduos calculistas e isolados do meio social. Mas no interior dos laboratórios, salas de aula, bibliotecas, existem pessoas tentando transcender a realidade imediata do dia-a-dia. Alguns deles são movidos pelo prazer conferido pelo conhecimento. Outros são movidos pela ascensão intelectual que podem alcançar. Ainda outros, são inspirados por pessoas.

Faço parte do grupo que pratica a atividade científica pelo prazer conferido pelo conhecimento bem como por inspiração no tocante a grandes seres humanos que constituíram cada momento de minha vida e de minha graduação.

Dedico, humildemente, esse simples trabalho, primeiramente a meu falecido pai, Claudemir, que partiu no quarto semestre de minha graduação. Creio absolutamente que nada aqui escrito possa se equiparar a tudo o que ele fez por mim. Não há comparação entre a dedicação de toda uma vida com um trabalho de conclusão de curso. Apenas gostaria que ele soubesse que o amo muito, independente das limitações sobre nós impostas pelas relações de materialidade.

Dedico ainda esse humilde trabalho à minha valorosa mãe, Ednalva, que sempre me conduziu pelos caminhos da educação. Se não fosse por sua insistência e brava correção, jamais estas palavras poderiam estar sendo escritas. Seu amor sempre foi incondicional, conduzindo-me pela vida com carinho e confiança, sempre me dando o braço, quando eu apenas lhe pedia a mão.

Dedico ainda o presente trabalho ao meu amor, Maria Luiza, o anjo que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida. Gostaria de poder recompensá-la, bem como aos demais citados, com muito mais do que as simples palavras que constituem esse trabalho. Seu amor me faz muito feliz e altamente realizado. Sou grato a ela desde o dia em que nos conhecemos. Eu te amo, Luiza, meu amor.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a meu falecido pai, Claudemir, bem como dedicar a ele o presente trabalho, por tudo que constituiu em minha vida, por tudo que construiu em mim e por tudo que representou, representa e representará para mim.

Quero agradecer à minha mãe Ednalva por tudo que me ajudou a construir e por todo o amor que dedicou e dedica todos os dias de sua vida a mim e ao meu sucesso.

Agradeço ao meu grande amor, Maria Luiza, por todo o bem conferido a mim desde o momento em que nos conhecemos.

Quero agradecer a meus amigos Lucas Ramon e Otávio Jordão, meus amigos de infância, que me proporcionaram momentos tão alegres e descontraídos.

Agradeço ao meu grande tio Edmilson por ter me ajudado na coleta da água do açude para minhas análises. Se não fosse por ele, eu ainda estaria procurando um local para coletar água para estudo e tentando encontrar uma forma de transportá-la.

Agradeço também ao meu grande amigo Luiz Nascimento por sempre ter me ajuda e estado à disposição. Fui aluno dele no IFRN-Campus João Câmara, e de lá para cá, tem se tornado um bom orientador e amigo. Obrigado, Luiz.

Agradeço a Ingrid Veras pela idealização do presente trabalho a partir de uma visita à uma estação de tratamento que não possui decantador, elaborando a ideia de um projeto de decantador.

Quero agradecer ao meu ex-professor de matemática do IFRN-Campus João Câmara Francisco Quaranta, dentre outras coisas, por ter semeado em mim o caráter questionador da realidade aparente, me levando a buscar relações lógicas dos fatos à minha volta, nunca aceitando o que é imposto.

Quero agradecer à professora Magna Angélica por ter me aceitado sob sua orientação mesmo estando cheia de alunos e muito atarefada com as disciplinas por ela ministradas.

Quero agradecer ao meu grupinho de amigos de graduação Gilmar Nogueira, Rafael Lemos, Vitor Fernandes e Jarson Araújo por sempre estarem ao meu lado nesses anos de Universidade.

RESUMO

A água é um bem de essencial importância para a manutenção da vida, em especial, a vida humana. A má distribuição da mesma acarreta sérios problemas sociais, sendo agravada pelo aumento da população dela dependente, poluição e desequilíbrios de ordem climática. O presente trabalho mostra resultados de ensaios de coagulação, floculação e decantação da água de açude, fazendo referência a importância utilizadas no tratamento de água, apresentando as etapas de um sistema de abastecimento, com ênfase nas operações unitárias utilizadas no processo. O objetivo do trabalho é a análise da ação do coagulante policloreto de alumínio, para projeto de um decantador, em duas concentrações distintas em uma amostra de água de açude. Para realização do trabalho, foram realizados ensaios em Jar-test com duas concentrações do coagulante, tendo sido ainda feitas análises físico-químicas dos parâmetros alcalinidade, teor de cloretos, dureza total, turbidez, condutividade, pH e sólidos sedimentáveis, para caracterização da amostra em estudo e verificação da eficiência do processo de coagulação-floculação. Os testes foram realizados tanto para a água bruta quanto para a água tratada com ambas as concentrações de coagulante. Para o dimensionamento do decantador, foi utilizado o método de Kynch, para o qual foi produzida uma curva de sedimentação para posterior determinação da área do decantador. Os ensaios de Jar-test revelaram que a ação do coagulante foi considerável na diminuição do teor de cloretos da amostra. Também houve uma redução significativa nos valores de turbidez. O ensaio de decantação, por efeito de erros operacionais acabou não gerando uma curva representativa da decantação, inviabilizando a aplicação da referida metodologia, bem como do projeto do decantador como um todo.

PALAVRAS-CHAVE: Coagulação, floculação, decantação, policloreto de alumínio, projeto de decantador.

SUMÁRIO

Introdução.....	8
I. Objetivos.....	8
II. Aspectos Teóricos.....	10
2.1. Brasil e disponibilidade hídrica.....	10
2.2. Etapas do sistema de abastecimento.....	10
2.3. Etapas do processo de tratamento de água.....	12
2.3.1. Coagulação.....	12
2.3.2. Floculação.....	14
2.3.3. Decantação.....	15
2.3.3.1. Projeto de decantadores.....	17
2.3.3.2. Método de Coe e Clevernger.....	19
2.3.3.3. Método de Kynch.....	20
2.3.4. Filtração.....	24
2.3.5. Desinfecção.....	25
III. Metodologia.....	27
3.1. Ambiente de estudo.....	27
3.2. Coleta e conservação das amostras.....	27
3.3. Análises realizadas.....	27
3.3.1. Coagulação.....	28
3.3.1.1. Determinação da velocidade angular do Jar-test.....	29
3.3.2. Floculação.....	30
3.3.3. Decantação.....	30
IV. Resultados e discussões.....	31
4.1. Água bruta.....	31
4.2. Água tratada.....	32

4.3. Ensaio de decantação.....	32
4.4. Discussões.....	36
V. Conclusão.....	38
VI. Referências.....	39

1. Introdução

A água é, sem sombra de dúvida, o elemento mais básico da vida. Sem ela, não haveria vida como entendemos hoje. Como forma de corroborar o presente fato, pode-se ilustrar com exemplos concretos verificados na natureza.

A importância da água nos dias atuais excede muito as necessidades de caráter biológico a ela associadas. A partir de um ponto de vista mais global, sabemos que apenas 10% da água doce disponível no mundo é utilizada para consumo humano, sendo 21% para os processos industriais e 69% para irrigação (LIBÂNIO, 2010). Ressalta-se novamente que são dados de caráter global, havendo claras e expressivas variações desses valores em diferentes países. Esse fato nos permite concluir que é essencial procurar fontes e mananciais para obter água para as referidas atividades. Uma realidade que demonstra com clareza a pouca disponibilidade de água doce no planeta é o fato de 68,9% de a mesma estar retida e imprópria para o uso em calotas polares.

Mesmo de posse dessa importante informação, sabemos que várias indústrias e pessoas em geral lançam seus dejetos em cursos d'água, realidade bastante comum e paradoxal.

De posse dessas informações, uma atividade que tenha como objetivo o tratamento da água doce é de extrema importância. Atualmente, existem várias ETA's (estações de tratamento de água) que utilizam operações unitárias, processos químicos e físicos para a obtenção final de água potável. Entre as operações de uma ETA convencional, encontram-se os processos de coagulação/floculação seguida por decantação e filtração (para remoção dos sólidos) e posterior desinfecção (RICHTER, 2009).

O projeto das ETA's, e mais especificamente, do decantador, se baseia na qualidade da água do manancial de abastecimento, bem como na qualidade da água requerida (atendimento a Portaria 2914/2011) e necessita estudos e caracterização na água desse manancial bem como testes de laboratório que forneçam embasamento teórico ao projeto.

Os testes de jarro ou ensaios de *Jar-test* são ponto de partida para o projeto de um decantador e devem ser realizados para verificar a concentração ótima do floculante, pH, alcalinidade, teor de cloretos, dureza total, turbidez, condutividade e sólidos sedimentáveis.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo geral: analisar a ação do coagulante policloreto de alumínio em uma amostra de água de Açude (Açude Grande, em João Câmara-RN) através de ensaios de Jar-test para projeto de um decantador.

Objetivos específicos:

- Testar as eficiências de duas diferentes dosagens do policloreto de alumínio;
- Avaliar a qualidade da água usada como amostra antes e depois do processo de coagulação/floculação.

2. Aspectos teóricos

2.1. Brasil e disponibilidade hídrica

O Brasil é um país extremamente rico em recursos naturais. Temos grande biodiversidade de fauna, flora e, como é de nosso maior interesse no presente trabalho, recursos hídricos.

Segundo Adeodato (2009), o país dispõe de cerca de 12% do total de água doce do mundo, possuindo o maior rio, em volume de água, e um dos principais aquíferos subterrâneos, além de satisfatórios índices pluviométricos.

Embora os referidos dados demonstrem a riqueza de disponibilidade hídrica de nosso país, a distribuição irregular da água é um grave problema que ainda jaz sem solução. Como forma de ilustrar essa realidade, valendo-se de dados estatísticos, temos que aproximadamente 70% da água doce disponível encontra-se na região Norte, onde apenas 10% de nossa população reside (Adeodato, 2009). Este é um fato decorrente de fatores geográficos.

Vários fatores de ordem antrópica contribuem para a baixa disponibilidade de água em várias regiões do país. Tais fatores também acabam prejudicando a disponibilidade de águas. Em regiões muito populosas, com complexos industriais e alto desenvolvimento urbano, a situação pode se agravar ainda mais. Nessas grandes cidades, uma grande quantidade de lixo e rejeitos (incluindo os industriais) é produzida. Boa parte desse material é lançada em lagos e rios.

O presente panorama apresentado evidencia a importância que têm os processos de tratamento de água. A água que é utilizada, e muitas vezes desperdiçada, deve voltar para a sociedade, garantindo assim a sustentabilidade do consumo. Para isso, essa água deve passar por tratamento para posteriormente retornar à sociedade dentro dos padrões de potabilidade que são estabelecidos pela Portaria 2914/2011, publicada pelo Ministério da Saúde.

2.2. Etapas do sistema de abastecimento

Na seção anterior, foi explorada a questão da disponibilidade de recursos hídricos em nosso país, bem como a disponibilidade de água doce no mundo. Foi problematizada a questão da irregular distribuição da mesma em nosso território, bem como a questão da poluição de corpos d'água.

As seções subsequentes visam mostrar como se realiza o processo de tratamento da água para a posterior reutilização pela população, traduzindo-se em uma tentativa clara de minimizar os efeitos provocados pelo desperdício, poluição e pouca disponibilidade local, assim como tentar atingir um patamar de consumo sustentável. Para introduzir o tema acima mencionado, será feita a exposição do funcionamento do processo de abastecimento de água.

Segundo Braga *et al.* (2005), o sistema de abastecimento é composto pelas seguintes etapas:

- **Manancial:** Todo processo de abastecimento deve ter uma fonte da qual se possa retirar o suprimento de água. Os mananciais podem ser lagos, lagoas, açudes, rios, entre outros. A escolha do manancial deve estar diretamente condicionada à disponibilidade de água que pode ser fornecida pelo mesmo, sem o risco de seca-lo posteriormente, e à qualidade dessa água, ou seja, das características por ela apresentadas, como odor, cor, sabor, turbidez, etc. Todavia não é estritamente necessário que a água do manancial seja potável para que a mesma seja utilizada no abastecimento.
- **Captação:** Trata-se do conjunto de equipamentos que são necessários para que seja realizada a retirada da água do corpo d'água. Entre os equipamentos mais utilizados, podemos citar as bombas, que irão imprimir uma queda de pressão que possibilite o escoamento do fluido, os canos, que são as vias de deslocamento da água, as válvulas, etc.
- **Adução:** Constitui-se na etapa do sistema estruturada por tubulações sem derivações, que faz a ligação entre o sistema de captação e o sistema de tratamento, ou ainda, entre o sistema de tratamento e o reservatório de distribuição. A adução pode ser realizada de três formas, por ação da força gravitacional, por recalque ou ainda pela junção das duas formas. Por questões de viabilidade econômica, é interessante sempre priorizar o processo via ação gravitacional, evitando gastos com energia.
- **Tratamento:** É a etapa do abastecimento que tem como um dos objetivos retirar as impurezas da água, bem como microrganismos patogênicos que porventura possam se fazer presentes, viabilizando o seu consumo posterior, realizando o reaproveitamento. O objetivo global dessa etapa consiste em tornar a água adequada conforme o Padrão de Potabilidade em vigor.
- **Reservatório de distribuição:** É empregado com a finalidade de acumular água, de forma a dar conta da variação horária de consumo da mesma. O acúmulo ainda é importante para manter a pressão mínima ou constante na rede e suprir em momentos emergenciais, como em incêndios ou ruptura de seções da rede.
- **Rede de distribuição:** A presente rede tem como finalidade abastecer residências, escolas, hospitais, indústrias, etc., a partir do reservatório de distribuição ou diretamente da adutora.

De posse das informações acima expostas, serão mostradas as etapas do processo de tratamento da água.

O tratamento de água é de extrema importância, pois são nele que se promovem as mudanças para obtenção de uma água potável, realizando um polimento no processo natural de reciclagem da água através de seu ciclo, que devido à ação do homem insere

no mesmo os mais diversos efluentes. As buscas por maneiras mais eficientes de tratamento é uma clara indicação dos esforços na luta contra a indisponibilidade de água, possibilitando formas mais efetivas de levar água potável a um número cada vez maior de pessoas.

2.3. Etapas do processo de tratamento de água

No presente tópico, serão expostas as etapas de tratamento de água que são utilizados atualmente em estações de tratamento.

O objetivo é fazer uma exposição dos conceitos básicos que essas operações envolvem, bem como a finalidade das mesmas. Dessa forma, pode-se ter uma visão, mais ampla, ainda que geral, de como esse trabalho é desenvolvido.

2.3.1. Coagulação

De acordo com Richter (2009), a coagulação é a primeira operação a qual a água é submetida. Ela tem como finalidade desestabilizar as partículas de sólidos presentes na massa de água, de maneira que as partículas possam se aglutinar, por efeito de deslocamento de fluido, formando flocos maiores e passíveis de sedimentação por ação natural de força gravitacional.

A coagulação também é referida na literatura como mistura rápida, devido ao elevado grau de agitação requerida nessa etapa. A etapa posterior, a floculação, é denominada mistura lenta, por empregar suave agitação ao fluido. Estas etapas são decisivas no processo de tratamento, pois são elas que promovem a aglutinação do material particulado presente na água, de modo que o sucesso de tratamento depende da boa condução e do bom planejamento das mesmas. As partículas são responsáveis principalmente pela cor e turbidez da água.

Partindo para a tentativa de uma definição formal do termo coagulação, recorreremos à fornecida por Richter (2009, p. 91):

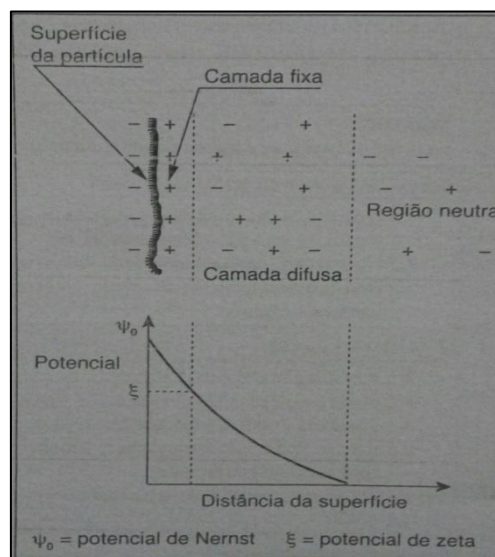
“Em uma acepção abrangente, coagulação é a alteração físico-química de partículas coloidais de uma água, caracterizada principalmente por cor e turbidez, produzindo partículas que possam ser removidas em seguida por um processo físico de separação, usualmente a sedimentação.” [RICHTER, 2009]

Na presente citação do referido autor, temos o termo partículas coloidais. Elas constituem o que se costuma denominar dispersão coloidal. Para que se possa ter uma melhor noção da dimensão das partículas, elas possuem tamanho da ordem de 0,001 µm (micrômetro) e 1 µm.

Para desestabilizar a suspensão, ou seja, para neutralizar a carga negativa das partículas constituintes, são adicionadas substâncias químicas. A mais utilizada e que figura com mais frequência na literatura é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$).

Uma questão interessante e importante a ser abordada nesse ponto é o mecanismo de desestabilização proporcionado pelo efeito neutralizador dos coagulantes. Primeiramente, deve-se entender como se estrutura a configuração das cargas elétricas em torno da superfície externa da partícula.

Figura 1 - Configuração de cargas e Potencial Zeta



Fonte: RICHTER, 2009, p. 94.

A Figura 1 é uma ilustração da referida configuração de cargas. A superfície da partícula é predominantemente carregada negativamente, fazendo com que cargas positivas se acumulem em sua superfície. Essa camada de cargas positivas recebe o nome de camada fixa. Envolvendo-a, temos uma segunda camada, constituída de cargas positivas e negativas denominada camada difusa. Ambas as camadas possuem potenciais elétricos inerentes. A camada difusa termina quando o potencial elétrico se anula, ou seja, quando a região da referida camada passa a ser neutra. O potencial da região que divide as camadas fixa e difusa é chamado de Potencial Zeta.

De posse desse conhecimento, pode-se mostrar o mecanismo de ação de coagulantes sobre as partículas. A substância que promoverá o fenômeno físico-químico deve ter propriedades que possibilitem a neutralização da carga negativa da partícula, tendo em vista e decorrente queda do potencial zeta. Com a diminuição do mesmo, as forças repulsivas entre as partículas que antes mantinham a suspensão coesa, estável e sem possibilidade de agregação, não mais existem ou são de ordem de grandeza desprezível. A adição da substância coagulante deve ser realizada sob intensa agitação, pois a interação com as partículas é praticamente instantânea (RICHTER, 2009). Assim, tem-se a garantia de que a o coagulante se dispersará por todo o volume de água que se está tratando.

Ainda que a abordagem do mecanismo de coagulação tenha aqui sido realizada de maneira qualitativa, seu conhecimento é importante para entender a importância do coagulante, bem como a operação de coagulação.

A grandeza que mede o grau de agitação da água é o gradiente de velocidade (G). Para que se possa interpretá-la de modo adequado, pensemos em um fluido se deslocando em regime laminar. Dos fenômenos de transporte de quantidade de movimento (mecânica dos fluidos), sabemos que o movimento se dá como se o fluido fosse constituído de camadas que se sobrepõem a uma distância Δy uma da outra e se deslocam com velocidades (v) diferentes. Uma partícula que se desloca em uma camada superior em relação a uma partícula que se desloca na camada adjacente inferior, colide com as partículas da camada inferior imediatamente adjacente, promovendo a aglutinação. Quanto maior a diferença de velocidade (Δv) entre essas duas camadas, maior é a agitação do fluido, pois maior será a razão $\Delta v/\Delta y$. No limite, quando as camadas estiverem infinitamente próximas ($\Delta y \rightarrow 0$), teremos o gradiente de velocidade em um determinado valor de y . Matematicamente, pode-se escrever:

$$G = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{dv}{dy}$$

Existem várias maneiras de promover a agitação rápida em uma instalação de uma estação de tratamento. A título de ilustração, segundo Richter (2009), pode-se citar alguns exemplos de instalações promoventes de mistura rápida:

- Mistura hidráulica em linha: a água percorre um conduto aberto ou fechado, no qual o próprio escoamento promove o gradiente de velocidade necessário para a coagulação.
- Mistura em singularidades de canalização: ocorre em placas de orifício, expansão súbita, curva ou mudança de direção em canos. O gradiente é obtido através do choque entre o fluido e as paredes da instalação.
- Ressalto por mudança de declive: ocorre quando a água que escoar por um plano inclinado e flui para uma região sem declive, causando grande turbulência, promovendo um gradiente adequado para a mistura rápida.
- Ressalto em calhas Parshall: a água escoar por uma garganta com declive que se estreita à medida que o mesmo se desloca, chocando-se com uma região com declive positivo que se alarga, promovendo altos valores de G .

2.3.2. Floculação

Segundo Richter (2009), a operação de tratamento que segue imediatamente após a coagulação é a floculação, também denominada mistura lenta. Nessa etapa, as partículas que foram desestabilizadas anteriormente podem se aglomerar, pois a carga predominantemente negativa de suas superfícies foi anulada pela adição da substância coagulante, de modo que não mais há repulsão eletrostática entre as mesmas. Em uma tentativa de definir mais claramente a operação de floculação:

[...] “definida como o processo de juntar partículas coaguladas ou desestabilizadas para formar maiores massas ou flocos, de modo a possibilitar sua separação por sedimentação e/ou filtração da água. É, sem dúvida, o processo mais utilizado para remoção de substâncias que produzem cor e turbidez na água.” (RICHTER, 2009)

Para que ocorra a aglomeração dos sólidos particulados responsáveis pela turbidez da água, é necessária agitação. Essa agitação pode ser promovida pelos mesmos mecanismos citados no item anterior referente à coagulação, ou ainda por agitadores mecânicos. O que deve ser levado em conta é o grau de agitação que essa etapa requer, que deve ser o suficiente para a promoção do transporte efetivo de fluido, possibilitando que ocorra o contato entre os flocos menores recém desestabilizados, de maneira que possam se agregar, formando assim, flocos maiores que podem posteriormente ser separados por ação da força gravitacional no processo de sedimentação.

Ainda de acordo com RICHTER (2009), as causas da aglutinação das partículas são o movimento browniano (referente ao movimento aleatório das moléculas da água) e o movimento global do fluido devido ao processo de agitação lenta.

Como mencionado anteriormente, a agitação é essencial nesta operação e tem como objetivo fazer com que as partículas desestabilizadas colidam e se aglutinem. Por outro lado, se a agitação possuir alta magnitude, flocos com diâmetro maior que determinado valor irão colapsar. Logo, deve-se ter conhecimento do grau de agitação e do tamanho de floco que se deseja obter por meio desta operação.

Vários pesquisadores foram responsáveis por possibilitar esse conhecimento, como Lagvankar (1968), Kaufman (1972) e Tambo (1979). De acordo com o trabalho dos referidos estudiosos, a relação entre o grau de agitação da água (gradiente de velocidade G) e o tamanho máximo assumido pelos flocos (diâmetro d_{max}) com esse grau de agitação é:

$$d_{max} = \frac{C}{G^n}$$

sendo G o gradiente de velocidade, C a concentração volumétrica de partículas e n um parâmetro dependente da microescala de turbulência.

Outra relação interessante é a que foi obtida por Soucek e Sindelar (1967). A equação por eles deduzida relaciona o gradiente de velocidade e o número de Reynolds (Re) com a desagregação dos flocos (S):

$$S = \frac{G}{\sqrt{Re}}$$

Para valores de S abaixo de 1,3, pode-se considerar desprezível o efeito de desagregação produzido pelo transporte de fluido (RICHTER, 2009).

2.3.3. Decantação

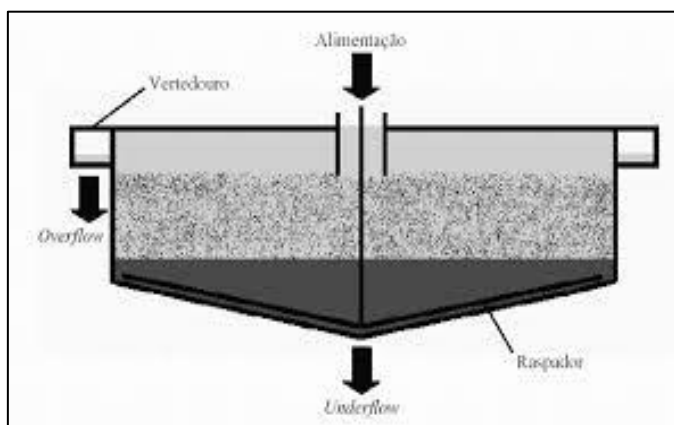
Os flocos formados na etapa anterior seguem para operação de decantação. Em algumas estações de tratamento não há a referida etapa. Após a floculação, a água passa direto para a etapa de filtração. O problema que acaba por surgir em várias estações, em resposta à exclusão da etapa de decantação, é a sobrecarga dos filtradores. Esse efeito deve ser corrigido com a limpeza constante dos filtros e reposição dos mesmos quanto

deixam de ser suficientemente eficientes. Para evitar problemas e implementar o processo de tratamento, a operação de decantação deve ser introduzida.

Segundo CREMASCO (2012), a etapa consiste na deposição do material sólido desestabilizado e floculado no fundo de um tanque (decantador). A deposição ocorre por ação da força gravitacional que arrasta as partículas em direção ao fundo, formando uma camada denominada de espessado ou região de compactação. Em uma tentativa de definir formalmente a referida operação unitária:

“A sedimentação é uma operação de separação sólido-líquido baseada na diferença de concentrações das fases presentes na suspensão a ser processada, sujeitas à ação do campo gravitacional. A decantação (ou sedimentação ou espessamento) da fase particulada ocorre normalmente em tanques cilíndricos, conhecidos como sedimentadores.” [CREMASCO, 2012]

Figura 2: Esquema de sedimentador contínuo



Fonte: NUNES, 2008, p. 1.

Na Figura 2 temos um decantador e podemos notar claramente a existência de três regiões distintas. No instante inicial, o corpo d'água apresenta-se aparentemente homogêneo. Com o passar do tempo, as partículas maiores, como possuem mais massa, adquirem maiores valores de velocidade de sedimentação, sedimentando mais depressa. Esse fato acarreta na formação das três fases que podem ser observadas na imagem acima.

No fundo, temos a região de compactação, formada pelos maiores flocos da amostra, que acabam por sedimentar mais rapidamente por apresentarem maiores valores de velocidade terminal de sedimentação. Na região central do tanque, temos a região de sedimentação livre, formada por partículas de tamanho intermediário que possuem menores valores de velocidade terminal. Finalmente, na região acima da de sedimentação livre, temos a de líquido clarificado, onde temos o fluido isento de sólidos.

Como foi exposto, no instante inicial da decantação, a água apresenta-se monofásica, ou seja, apresenta apenas a região de sedimentação livre. Com o passar do tempo, essa região começa a diminuir e as regiões de compactação e clarificado começam a se formar. Em um determinado instante, a região de sedimentação livre desaparece. A partir desse momento, a sedimentação consistirá na lenta expulsão da água presente nos interstícios formados pelas partículas maiores da região de compactação, promovendo assim a acomodação dessa fase particulada, que pode ser observada pela pequena diminuição da altura da referida região.

Em sedimentadores contínuos, como é o caso da Figura 2, temos a formação do espessado, que também é chamado de lama ou torta de fundo. Para que a referida fase seja removida, garantindo assim a continuidade do processo, são utilizados raspadores mecânicos, que rotacionam levemente, de maneira a direcionar os sólidos para a saída do tanque.

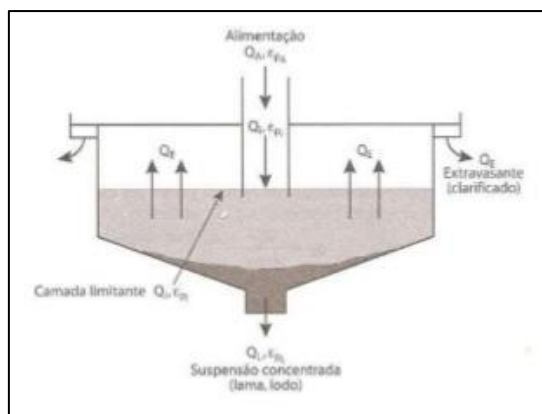
De posse desses conhecimentos, pode-se agora partir para o projeto de decantadores, que se baseará em balanços de massa realizados no tanque e em métodos de determinação de parâmetros característicos do processo de sedimentação.

2.3.3.1. Projeto de decantadores

O projeto e o dimensionamento de decantadores consistem na determinação dos valores referentes à área transversal e da altura do tanque (CREMASCO, 2012).

A Figura 3 a seguir apresenta os fluxos mássicos em um sedimentador contínuo:

Figura 3: Fluxos mássicos em sedimentador contínuo



Fonte: CREMASCO, 2012.

A alimentação consiste num fluido que contém sólidos passíveis de sedimentação por ação de força gravitacional. A vazão de fluido na entrada do tanque de sedimentação é simbolizada por Q_A e a fração de sólidos particulados é simbolizada por ϵ_{pA} . Os parâmetros Q_i e ϵ_{pi} são referentes à camada limitante que figura na ilustração.

Os parâmetros Q_L e ϵ_{pL} são a vazão do espessado (lama de fundo) e a fração de partículas no mesmo, respectivamente.

O primeiro passo para o dimensionamento é determinação da área do tanque de sedimentação. Um balanço de massa referente à fase particulada deve ser realizado. A concentração volumétrica de partículas é definida pela razão entre a concentração mássica da fase particulada ($\bar{\rho}_p$) e a massa específica das partículas contidas nessa fase (ρ_p) (CREMASCO, 2012). Assim, podemos escrever:

$$\varepsilon_p = \frac{\bar{\rho}_p}{\rho_p}$$

Como $\rho_p = m_p/V_p$ e $\bar{\rho}_p = m_p/V_T$, podemos escrever:

$$\varepsilon_p = \frac{m_p}{V_T} \frac{V_p}{m_p} = \frac{V_p}{V_T}$$

A expressão resultante nos permite interpretar ε_p como a fração volumétrica entre o volume de partículas e o volume de fluido, a partir da forma como foi definido, que é a razão entre a concentração mássica da fase particulada e a massa específica da mesma.

A massa de partículas que entra no tanque de sedimentação deve ser igual à massa de partículas que saem, de modo a não haver acúmulo e o posterior comprometimento do processo devido à sobrecarga de sólidos, sendo necessária ainda a remoção dos mesmos, interrompendo assim o processo, gerando transtornos, custos de manutenção e a suspensão da operação enquanto durar o procedimento. Assim, podemos escrever:

$$Q_A \varepsilon_{pA} = Q_i \varepsilon_{pi} = Q_L \varepsilon_{pL}$$

sendo que a vazão de partículas na alimentação é dada por $Q_A \varepsilon_{pA}$; a vazão na saída (lama de fundo) é dada por $Q_L \varepsilon_{pL}$; $Q_i \varepsilon_{pi}$ é o fluxo de partículas na camada limite.

Agora será realizado o balanço de massa do líquido. Novamente não se pode ter acúmulo. Logo, toda massa de fluido que entra na alimentação do tanque deve sair, seja na lama de fundo ou no extravasante (Q_E) que é constituído de líquido clarificado. Assim, podemos escrever:

$$Q_i(1 - \varepsilon_{pi}) = Q_E + Q_L(1 - \varepsilon_{pL})$$

Isolando a vazão do extravasante:

$$Q_E = Q_i(1 - \varepsilon_{pi}) - Q_L(1 - \varepsilon_{pL})$$

Do balanço de massa da fase particulada, sabemos que:

$$Q_L = \frac{Q_i \varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{pL}}$$

Assim, substituindo na equação do balanço de massa da fase fluida, obtemos:

$$Q_E = Q_i(1 - \varepsilon_{pi}) - \frac{Q_i \varepsilon_{pi}}{\varepsilon_{pL}}(1 - \varepsilon_{pL})$$

Desenvolvendo algebricamente a expressão acima, pode-se obter facilmente a seguinte relação:

$$Q_E = Q_i \varepsilon_{pi} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)$$

Olhando novamente para o balanço de massa da fase particulada, temos: $Q_A \varepsilon_{pA} = Q_i \varepsilon_{pi}$, assim, podemos escrever:

$$Q_E = Q_A \varepsilon_{pA} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)$$

Sabemos ainda que a vazão de extravasante é dada pelo produto da velocidade ascensional do fluido pela área do decantador: $Q_E = A_D q_E$. Assim podemos escrever:

$$q_E A_D = Q_A \varepsilon_{pA} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)$$

Mas sabemos que o líquido clarificado não pode conter sólidos, ou seja, que a velocidade ascensional do clarificado não pode exceder a velocidade de sedimentação das partículas, de forma que nenhuma massa de sólido seja carregada pela extravasante. Logo, temos que $q_E \leq q_i$, sendo q_i a velocidade de sedimentação das menores partículas. Como basta que $q_E = q_i$ para que não haja partículas no extravasante, iremos fazer essa consideração na equação determinante da área transversal do decantador. Logo, podemos escrever:

$$A_D = \frac{Q_A \varepsilon_{pA}}{q_i} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)$$

A equação acima é a que determina a área transversal de um decantador contínuo. Porém, temos ainda duas variáveis que não são conhecidas: a velocidade mínima de decantação da fase particulada (q_i) e a fração de partículas na camada limitante. Para vencer esse impasse, existem alguns métodos para a determinação dos valores dessas variáveis. No presente trabalho, serão apresentados dois métodos de determinação, a saber:

- Método de Coe e Clevenger;
- Método de Kynch.

2.3.3.2. Método de Coe e Clevenger

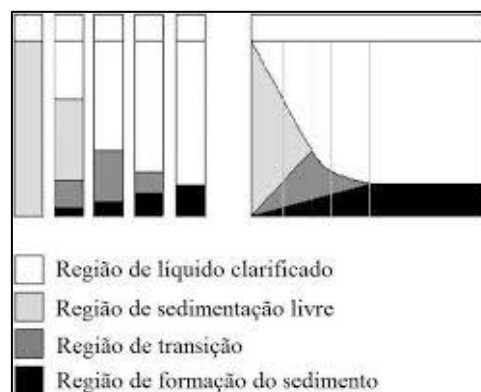
Esse método foi uma das primeiras tentativas de realizar o projeto de decantadores, tendo sido usado por mais de meio século (DAMASCENO, 1998).

O método consiste em testes de sedimentação em batelada utilizando provetas. Primeiro, deve-se estabelecer, por meio de metas de projeto, quais serão os valores de ε_{pA} e de ε_{pL} . Várias suspensões, com concentrações diferentes e que variam entre ε_{pL} e ε_{pA} (incluindo esses valores), devem ser preparadas. Os ensaios são realizados promovendo a decantação em proveta de cada uma das suspensões com as concentrações ε_{pA} , ε_{p1} , ε_{p2} , ..., ε_{pL} . Para cada suspensão, é montada uma curva da altura da fase particulada (altura da região de sedimentação livre que tende a ser a altura da região de espessado no final da sedimentação) em função do tempo. O valor da velocidade ascensional de fluido na camada limitante é dado pela inclinação da reta tangente à curva de sedimentação no ponto (t_0, z_0) . Logo, como cada curva de sedimentação é feita para cada valor de ε_p da suspensão, obtemos, para cada ensaio, um par (ε_{pi}, q_i) . O par que será considerado de projeto é aquele que, quando substituído na equação da área do decantador, levar ao maior valor para essa área.

2.3.3.3. Método de Kynch

O presente método tem a grande vantagem de recorrer a apenas um ensaio de proveta para a determinação da área do decantador. Na Figura 4 podemos ver as quatro regiões previstas pela teoria de Kynch:

Figura 1: Regiões previstas pela teoria de Kynch



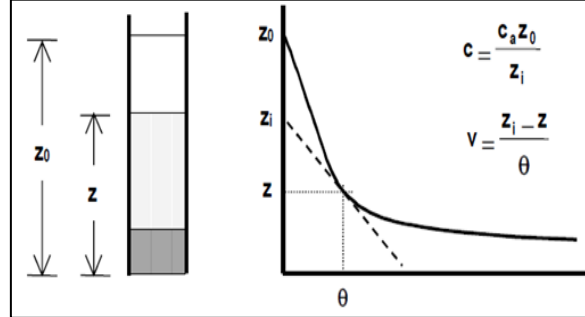
Fonte: CREMASCO, 2012, p. 338.

Segundo Damasceno (1998), Kynch, no ano de 1952, elaborou uma teoria matemática da sedimentação, valendo-se apenas da equação da continuidade da fase particulada, produzindo uma descrição simplificada do processo de decantação em batelada. Várias considerações foram por ele estabelecidas. O método permite que obtenhamos os pares (ε_{pi}, q_i) a serem utilizados na equação da área do decantador com apenas um ensaio de proveta, como já foi exposto anteriormente.

Um dos resultados da teoria, do referido estudioso, de interesse aqui é a previsão teórica da existência de quatro regiões (fases) na sedimentação, como ilustrado na referida figura. A área denominada região de transição é onde se concentra o método.

A metodologia consiste em, depois de montada a curva de sedimentação, traçar retas tangentes à curva nos pontos obtidos no ensaio de decantação. A figura abaixo ilustra essa etapa do método:

Figura 5: Curva do método de Kynch



Fonte: CREMASCO (2012).

Os pontos nos quais se traçarão as retas tangentes são os pontos do ensaio que se encontram na região de transição.

No ponto que uma reta tangente toca o eixo z , temos o valor de seu coeficiente linear, que denominamos z_i . Como teremos várias dessas retas tangentes, teremos vários valores de z_i , que serão importantes no cálculo dos valores de ε_{pi} .

O volume de partículas por unidade de área de uma seção transversal ao recipiente em uma altura z_i (N_0), é dado por:

$$N_0 = \varepsilon_{pi} z_i$$

Para compreender essa relação, deve-se ter em mente que qualquer ε_p é a fração do volume de partículas pelo volume total. Considerando esse fato, tendo em vista ainda que no início do processo de decantação se tinha apenas uma fase homogênea de sedimentação livre, na qual o volume total de partículas por unidade de área de seção transversal era dado por $N_0 = \varepsilon_{p0} z_0$, podemos escrever a seguinte relação:

$$\varepsilon_{pi} z_i = \varepsilon_{p0} z_0$$

lembrando que $\varepsilon_{p0} = \varepsilon_{pA}$. Resultando em:

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\varepsilon_{p0} z_0}{z_i}$$

Assim, com os diversos valores de z_i encontrados a partir das retas tangentes aos pontos internos à região de transição, podemos calcular os respectivos valores para ε_{pi} . Os valores de q_i são numericamente iguais aos valores absolutos das inclinações das referidas retas tangentes. Agora, pode-se dispor de vários pares (ε_{pi}, q_i) , que serão usados na equação da área do decantador para determinar o valor deste parâmetro. O maior valor obtido para a referida área é o que é adotado como valor de projeto.

Para aplicação do método, uma curva de sedimentação deve ser obtida a partir de um ensaio de proveta. O ensaio deve ser realizado após as etapas de coagulação e floculação, de modo que as partículas se aglomerem adquirindo tamanho e massa suficiente para decantarem.

Com a curva de sedimentação, podemos traçar uma linha de tendência com bom ajuste (valor de R^2 próximo de 1) nos dados para calcularmos os valores das inclinações das retas tangentes nos pontos da curva. Desse modo, podemos calcular os valores de q_i para todos os pontos da curva, não necessariamente somente para os da região de transição, como propõem o método, lembrando que esse valor corresponde ao módulo do valor da derivada, logo, podemos escrever:

$$q_i(t) = \left| \frac{dy(t)}{dt} \right|$$

Agora, devemos determinar os valores de z_i . Chamando a reta tangente à curva numa abscissa t_i de y_{ti} , podemos escrever:

$$y_{ti} = \frac{dy(t_i)}{dt} t + z_i$$

Como a reta y_{ti} toca o eixo das ordenadas num z_i , é correto colocar esse valor como o de seu coeficiente linear. Isolando z_i na equação acima, podemos determinar o meu valor para um ponto qualquer da curva de sedimentação, sendo que y_{ti} deve ser o valor da altura experimental no tempo t_i .

Os valores de ε_{pi} podem ser calculados, segundo a teoria de Kynch, pela expressão:

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\varepsilon_{p0} z_0}{z_i}$$

Pomos notar a continuidade do método, pois acabou-se de determinar os valores respectivos de z_i .

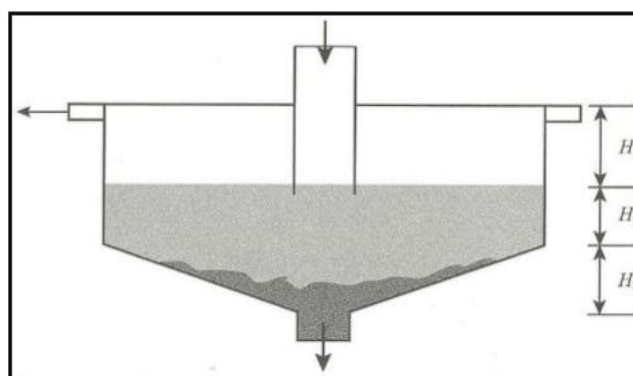
Para calcularmos o diâmetro do decantador a partir da equação da área, pode-se substituir o valor da área em função do diâmetro na referida equação e isolar o diâmetro, da seguinte maneira:

$$\frac{\pi D_D^2}{4} = \frac{Q_A \varepsilon_{pA}}{q_i} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)$$

$$D_D = \sqrt{\frac{4 Q_A \varepsilon_{pA}}{\pi q_i} \left(\frac{1}{\varepsilon_{pi}} - \frac{1}{\varepsilon_{pL}} \right)}$$

A Figura 6 evidencia a composição da altura total do equipamento como sendo a soma das três alturas assinaladas:

Figura 6: Altura do decantador



Fonte: CREMASCO, 2012.

A partir da imagem ao lado, podemos escrever que a altura final do tanque de decantação (H_D) é igual à soma das alturas assinaladas. Logo:

$$H_D = H_1 + H_2 + H_3$$

A altura H_1 é a altura da região de líquido clarificado, H_2 é a altura da região de espessamento ou de sedimentação livre e H_3 é a altura da região de fundo do decantador. De posse destas informações, pode-se realizar a determinação de cada uma das alturas.

Segundo o referido autor, H_1 varia entre os valores de 0,45 m e 0,75 m. Para os valores de H_3 , temos a seguinte relação:

$$H_3 = 0,073A_D$$

sendo A_D a área do decantador determinada anteriormente.

Para se determinar o valor de H_2 , será utilizada a seguinte relação, ainda segundo o referido autor:

$$H_2 = \frac{4}{3} z_{min} \left(\frac{t_R}{t_{min}} \right)$$

sendo z_{min} dada pela seguinte relação:

$$z_{min} = z_0 \frac{\varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{pL}}$$

o tempo de residência t_R da fase particulada na região de compactação é o intervalo de tempo compreendido entre os pontos com concentrações ε_{p0} e ε_{pL} ; t_{min} é o tempo para o qual atinge-se a altura z_{min} .

De posse dos valores das três alturas referidas na Figura 6, basta soma-las para obtermos ao final a altura do equipamento que se deseja projetar.

2.3.4. Filtração

A filtração é uma operação unitária dos processos de tratamento de água que consiste em fazer passar uma corrente de água em tratamento por um meio poroso, tendo em vista a retenção de materiais sólidos particulados que ainda possam se fazer presentes mesmo depois das operações anteriormente abordadas.

Segundo RICHTER (2009), do ponto de vista histórico, a filtração foi a primeira operação ou procedimento de tratamento de água que se têm registro, tendo sido por volta do ano 1804, na cidade de Paisley, na Escócia, por John Gibb. Na época, o tratamento que era feito apenas pela etapa de filtração, que tinha como princípio básico, fazer passar a massa de água por um meio poroso, que no caso era areia. Definindo formalmente a operação:

“A filtração é um processo físico-químico e, em alguns casos, biológico [...] para a separação de impurezas em suspensão na água, mediante sua passagem por um meio poroso. Diversos materiais podem ser usados como meio poroso. A areia é o mais comum, seguido de antracito, areia de granada, carvão ativado granular, etc.”
[RICHTER, 2009]

O tamanho dos grãos constituintes do meio poroso tem grande influência no processo, pois influenciam parâmetros de importância crucial no mesmo, como na porosidade, área superficial interna e permeabilidade.

Entre os mecanismos de remoção por elas previstos, pode-se citar os seguintes:

- Interceptação;
- Difusão;
- Inércia;
- Sedimentação;
- Ação hidrodinâmica.

Uma proposta de forma de remoção de material particulado que é interessante abordar é a por acúmulo de partículas na superfície interna do material poroso. Ao se fixarem nas paredes internas dos poros, as partículas acabam por diminuir os espaços disponíveis para o escoamento do fluido, diminuindo assim a porosidade (ε) do meio. Com ε pequeno, temos maior perda de carga dentro da estrutura porosa, diminuindo drasticamente a permeabilidade (k) da mesma (RICHTER, 2009). A relação entre a porosidade e a permeabilidade é dada pela equação de Kozeny para partículas esféricas:

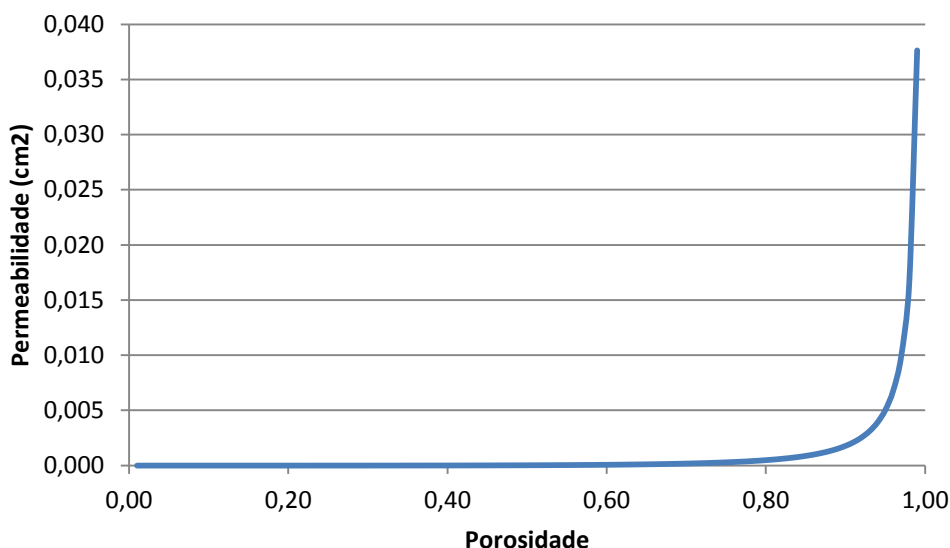
$$k = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{36\beta(1 - \varepsilon)^2}$$

sendo D_p o diâmetro das partículas e β é dada pela equação de Happel (1958):

$$\beta = \frac{\varepsilon^3 \left[1 + \frac{2}{3}(1 - \varepsilon)^{5/3} \right]}{2(1 - \varepsilon) \left[1 - \frac{3}{2}(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} + \frac{3}{2}(1 - \varepsilon)^{\frac{5}{3}} - (1 - \varepsilon)^2 \right]}$$

Para fins ilustrativos, supondo $D_p = 0,2 \text{ cm}$, pode-se construir a curva da permeabilidade em função da porosidade, como na Figura 7:

Figura 7: Permeabilidade em função porosidade



Fonte: o autor

Quanto menores os valores de porosidade de um meio, menor é sua permeabilidade. Logo, o cuidado com limpeza e manutenção dos filtros é de extrema importância para o sucesso desta operação, como se pode perceber do gráfico acima, que demonstra o quão sensível é a permeabilidade em termos de porosidade.

2.3.5. Desinfecção

A desinfecção é um processo que tem como objetivo a inativação de microrganismos patogênicos que existem na água. É a última etapa do processo de tratamento.

Muito embora, nas etapas anteriores, microrganismos tenham sido removidos da água em tratamento devido ao fato de estarem associadas às partículas coloidais ou flocos, ou por terem sido carregados na decantação, a desinfecção se faz necessária, pois ainda é muito provável que hajam patógenos na mesma.

De acordo com LIBÂNIO (2010), pode-se destacar:

“A desinfecção constitui-se praticamente na última etapa do tratamento relacionada à consecução do objetivo de produzir água de

consumo isenta da presença de microrganismos patogênicos, cuja inativação realiza-se por intermédio de agentes físicos e/ou químicos.”
[LIBÂNIO, 2010]

Segundo Richter (2009), os microrganismos de interesse para o tratamento de água são bactérias, vírus (não levando em conta aqui a problemática de se incluir ou não vírus como seres vivos), protozoários, vermes e algas.

3. Metodologia

Para realização foram definidas 3 etapas de trabalho, além da caracterização do ambiente e amostra em estudo, coleta e conservação das amostras e pesquisa bibliográfica.

3.1. Ambiente de estudo

A água utilizada para as análises foi coletada em um açude do interior do Estado, na cidade de João Câmara, que fica a cerca de 72 *km* de Natal.

Há alguns anos, o Açude Grande, como é chamado, era uma fonte de água importante para as comunidades que se estabeleciam em seu entorno. Hoje em dia, o mesmo encontra-se com um volume de água drasticamente reduzido, não possuindo mais peixes nem servindo para consumo. Segundo moradores locais, a água do mesmo é utilizada em construções.

3.2. Coleta e conservação das amostras

Foram coletados 20 *L* da água do açude como amostra. O recipiente utilizado para a coleta e posterior armazenagem foi um galão convencional de água mineral. As amostras foram conservadas no laboratório sob refrigeração.

Os procedimentos de coleta, conservação e técnicas de análise foram realizados seguindo as normas, conforme preconizado pela American Public Health Association - APHA (2005).

3.3. Análises realizadas

A fonte foi escolhida tendo em vista as várias famílias que ainda dependem da mesma para desenvolverem suas atividades mais básicas. O presente fato é preocupante em consequência das condições apresentadas pela água.

O coagulante utilizado para atuar no tratamento foi o policloreto de alumínio 18%, fornecido pela empresa CAERN. O valor de sua densidade, fornecido pela referida empresa, e determinado em laboratório foi de 1,27 g/cm^3 . 1,270 g/cm^2 .

Foram realizadas sete análises com a água bruta (sem nenhum prévio tratamento físico-químico), de forma a se obter o perfil do corpo d'água. Depois do tratamento com as operações de coagulação, floculação e decantação, foram realizados novamente esses testes de maneira a se obter uma caracterização da água tratada.

As análises, efetuadas no processo de caracterização da água tanto bruta como tratada, tinham como objetivo a determinação dos seguintes parâmetros:

- Alcalinidade;

- Teor de cloretos;
- Dureza total;
- Turbidez;
- Condutividade;
- pH;
- Sólidos sedimentáveis.

A partir da comparação desses valores antes e após o tratamento, podemos estudar a ação do coagulante sobre a amostra. Será tratada agora a metodologia utilizada para o tratamento das amostras. Posteriormente, as análises de caracterização tanto para a água bruta quanto para a tratada serão abordadas.

3.3.1. Coagulação

Para a realização da presente operação, foi utilizado um aparelho Jar-test com seis hélices para a rotação das amostras. Os recipientes nos quais as mesmas foram submetidas à agitação (gerando um gradiente de velocidade no fluido como consequência) foram béqueres de 1 L.

Como já foi mencionado, o coagulante utilizado foi o policloreto de alumínio 18%. Como a empresa fornecedora não informa a concentração, foi convencionada uma forma de quantificar o coagulante utilizado. A quantidade de coagulante para cada amostra foi convencionada como a massa da solução de coagulante disponibilizada por litro de amostra. Chamando essa quantidade de coagulante por litro de solução de concentração do coagulante, designada por C_{coag} , podemos escrever:

$$C_{coag} = \frac{\text{Massa do coagulante (mg)}}{\text{Volume da amostra (L)}}$$

As massas de coagulante testadas foram de 1,0 mg e 5,0 mg. Logo, como nos béqueres foram adicionados apenas 800 mL de água, temos as concentrações de coagulante:

$$(C_{coag})_1 = \frac{1,0 \text{ mg de coagulante}}{0,8 \text{ L de amostra}} = 1,25 \text{ mg/L}$$

$$(C_{coag})_2 = \frac{5,0 \text{ mg de coagulante}}{0,8 \text{ L de amostra}} = 6,25 \text{ mg/L}$$

Essas foram as concentrações de coagulante utilizadas. Como a densidade do coagulante é de 1,270 g/cm³, em 1 mL temos 1,27 g. Logo, como precisamos de apenas de 1,0 mg e 5,0 mg, foram necessárias algumas diluições. O tempo de agitação sugerido por RICHTER (2009) para essa etapa é de 1 minuto.

Embora o equipamento acomodasse seis béqueres, foram utilizados apenas quatro deles.

3.3.1.1. Determinação da velocidade angular do Jar-test

Segundo Richter (2009), é recomendável, para a operação de coagulação, utilizar rotação igual ou superior a 100 *rpm*. Mas o aparelho Jar-test que se tinha a disposição não era mais capaz de informar ao usuário esses valores de rotação. Logo, um método de determinação da velocidade angular das hélices do equipamento era estritamente necessário.

Para a determinação desta, retirou-se a tampa superior do equipamento de forma que ficasse visível o sistema de correia que põem em rotação as seis hélices. Foi marcado um ponto na correia de forma que seu movimento pudesse se acompanhado. No sistema de polias que conecta as hélices, existe uma trajetória retilínea que se estende por toda a largura do equipamento, que aqui denotaremos por Δx_{if} . O valor do deslocamento retilíneo foi medido sendo $\Delta x_{if} = 93,7 \text{ cm}$. A análise do movimento do ponto marcado na correia nessa região permitia, a partir da determinação do tempo (Δt) que a mesma leva para percorrer esse comprimento, sua velocidade v_e .

Os valores dos raios das polias (r_p) que se conectam às hastes das hélices são todos iguais e valem $r_p = 1,4 \text{ cm}$. Assim, podemos expressar a velocidade da emenda na região retilínea como:

$$v_e = \frac{\Delta x_{if}}{\Delta t}$$

Como não houve deslizamento entre a polia e a correia, podemos escrever que a velocidade angular da polia (ω_p) é dada por:

$$\omega_p = \frac{v_e}{r_p}$$

A presente velocidade angular possui unidade de radianos por segundo (*rad/s*). Para termos unidade de rotação por segundo (*rps*), basta que multipliquemos o membro esquerdo da referida equação por 2π . Logo, podemos escrever:

$$v_e = 2\pi\omega_p r_p$$

Substituindo essa expressão na da velocidade da emenda da polia, obtemos:

$$2\pi\omega_p r_p = \frac{\Delta x_{if}}{\Delta t}$$

Isolando ω_p , temos:

$$\omega_p = \frac{\Delta x_{if}}{2\pi r_p (\Delta t)}$$

Como os valores de Δx_{if} e r_p estão em centímetros e Δt é medido em segundos, temos que a velocidade angular das polias (que é a mesma das hélices, pois estão

conectadas), pela presente equação, terá unidade de *rps*. Para obtermos a velocidade angular em *rpm*, basta multiplicar o membro direito pelo fator (60 *s/min*). Assim, podemos escrever:

$$\omega_p = \frac{\Delta x_{if}}{2\pi r_p(\Delta t)} (60 \text{ s/min})$$

Poderíamos ainda simplesmente converter para minutos os valores medidos de tempo. O valor de *rpm* utilizado nas análises foi de 137 *rpm*.

3.3.2. Floculação

A etapa de floculação ocorreu no mesmo equipamento com as mesmas ferramentas. A diferença foi apenas a velocidade de agitação conferida as amostras.

Segundo Richter (2009), deve-se ter velocidade angular das amostras dentro do intervalo de 40 e 50 *rpm*. O valor adotado nas análises foi de 47 *rpm*, tendo sido ajustado segundo as equações de velocidade angular das hélices obtidas anteriormente.

3.3.3 Decantação

A presente operação ainda não é a referente ao dimensionamento do decantador, sendo apenas a etapa subsequente do processo de tratamento.

Segundo RICHTER (2009), o tempo de decantação deve estar dentro do intervalo de 15 a 20 minutos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Água bruta

Antes das operações referentes ao tratamento da amostra, foram realizadas sete análises a partir da água bruta com a finalidade de caracterizá-la, como comentado anteriormente. Serão abordados agora os testes com a água bruta bem como os seus resultados.

Alcalinidade

Tendo sido efetuado o ensaio para determinação da alcalinidade, o valor obtido foi de:

$$\text{Alcalinidade (mg } C_aCO_3 \text{ por litro)} = 242$$

Cloretos

Tendo sido efetuado o ensaio para determinação do teor de cloretos, o valor obtido foi de:

$$\text{mg Cl por litro} = 89,47$$

Como a amostra estava diluída a 1%, temos que o teor de cloretos na amostra bruta é 8947 mg Cl por litro.

Dureza total

Tendo sido efetuado o ensaio para determinação da dureza total, o valor obtido foi de:

$$\text{mg } C_aCO_3/L = 36$$

Como a amostra estava diluída a 1%, a dureza total é 3600 mg C_aCO_3/L .

Turbidez

A determinação da turbidez da amostra bruta foi realizada em um turbidímetro. O valor da referida medida foi 9,3 NTU.

Condutividade

A determinação da condutividade da amostra bruta foi realizada em um condutivímetro. O valor da referida medida foi 12,71 mS/cm.

pH

A determinação do pH da amostra bruta foi realizada em um pHmetro. O valor da referida medida foi 7,82.

Sólidos sedimentáveis

No caso da água bruta, tivemos um valor de sólidos sedimentáveis igual a 0,1 mL/L.

4.2. Água tratada

As mesmas análises foram realizadas após o tratamento que engloba as operações de coagulação, floculação e decantação. Como cada análise foi mostrada nos itens anteriores referentes à água bruta, aqui serão expostos todos os resultados em uma tabela. Como foram utilizadas duas concentrações de coagulante nas amostras, serão mostrados os resultados dos experimentos para ambas as concentrações, todos em duplicata.

Tabela 1: Resultados dos ensaios com água bruta e tratada

Testes	Água bruta	Água tratada	
		Dose 1	Dose 2
Alcalinidade (mg/L)	242	235	231
Teor de Cloretos (mg/L)	8947	5348	5198
Dureza total (mg/L)	3600	3100	3100
Turbidez (NTU)	9,3	3,2	2,9
Condutividade (mS/cm)	12,71	12,85	12,86
pH	7,82	7,33	7,40
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	0,10	0,08	0,07

Fonte: o autor

4.3. Ensaio de decantação

Para realizar o ensaio de decantação, o procedimento de coagulação-floculação foi mais uma vez realizado. Novamente, duas concentrações foram utilizadas a saber:

- Concentração 1: 6,25 mg/L;
- Concentração 2: 1,9 g/L.

Durante os ensaios de tratamento da água, no que se refere às operações de coagulação-floculação-decantação, notou-se que as concentrações de coagulante que estavam sendo utilizadas produziam flocos pequenos e que não decantavam num período de tempo usual. Logo, queria-se utilizar uma concentração bem maior para notar o que se sucederia à suspensão. O resultado foi que os flocos produzidos foram não só bem mais numerosos como mais massivos, produzindo uma decantação mais eficiente e efetiva.

Quando as operações de coagulação-floculação foram realizadas com as concentrações referidas acima para o posterior ensaio de decantação para o projeto do decantador, pôde-se perceber que a amostra com concentração 1 continha flocos que não sedimentaram. A amostra com concentração 2 continha flocos que sedimentaram de

forma que se podia perceber as regiões de líquido clarificado, região de livre sedimentação e de compactação. A curva de decantação foi construída a partir dos dados referentes à amostra com a concentração 2.

Foi montada uma tabela com os valores da altura da suspensão em função do tempo. A tabela aparece abaixo:

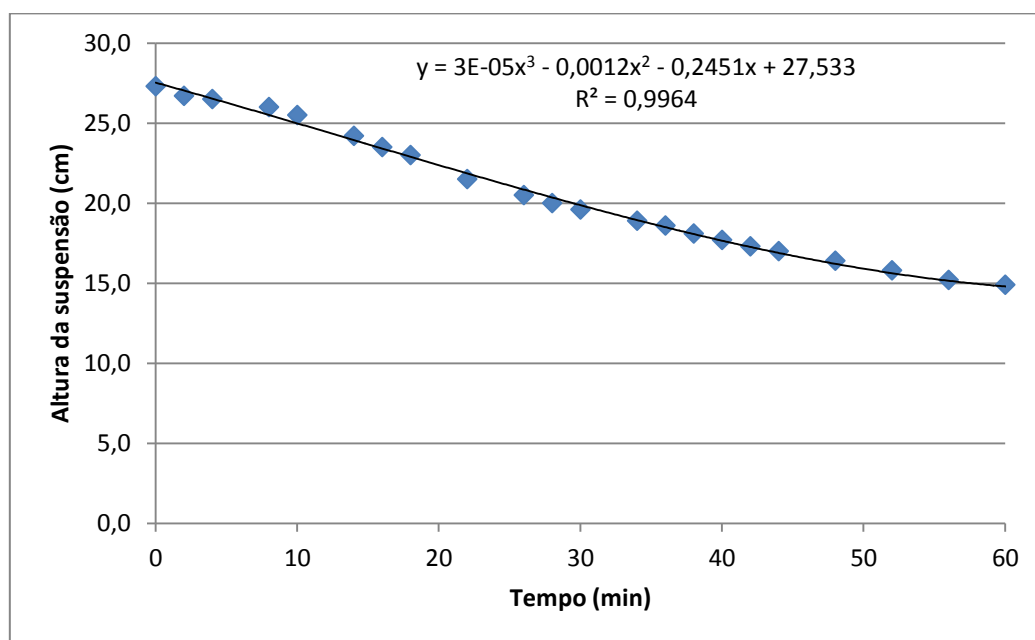
Tabela 2: Dados do ensaio de sedimentação

Ensaio de decantação			
t (min)	z (cm)	t (min)	z (cm)
0	27,3	34	18,9
2	26,7	36	18,6
4	26,5	38	18,1
8	26,0	40	17,7
10	25,5	42	17,3
14	24,2	44	17,0
16	23,5	48	16,4
18	23,0	52	15,8
22	21,5	56	15,2
26	20,5	60	14,9
28	20,0	64	14,3
30	19,6		

Fonte: o autor

A partir da Tabela 1, foi construída a curva de sedimentação, que figura logo abaixo:

Figura 2: Curva de decantação



Fonte: o autor

Para determinarmos efetivamente o diâmetro do decantador, precisamos de alguns valores de projeto como Q_A , ε_{pA} e ε_{pL} . Admitiremos que a alimentação de entrada seja $Q_A = 15 \text{ m}^3/\text{h} = 250000 \text{ cm}^3/\text{min}$. Devemos encontrar o valor de ε_{pA} . Com a finalidade de determiná-lo, foi realizada uma busca por valores de sólidos suspensos (SS) em artigos acadêmicos, pois não se pôde realizar a presente determinação no laboratório. Para efeito de cálculo, no tocante ao projeto do decantador, é necessário que se tenha esse valor. Segundo SILVA *et al.* (2014), o valor do parâmetro sólidos suspensos do Açude Gargalheiras, é de 35 mg/L . Este valor será tomado como o representativo do açude em estudo.

O valor de sólidos suspensos corresponde à massa de sólido por unidade de volume da água bruta, logo, podemos escrever $\bar{\rho}_{p0} = SS = 0,035 \text{ g/L}$. Segundo MACÊDO (2001), A densidade de corpos d'água lênticos é, em média, $\rho_p = 2,10 \text{ g/cm}^3$, ou 2100 g/L . Assim, podemos calcular ε_{pA} :

$$\varepsilon_{pA} = \frac{\bar{\rho}_{p0}}{\rho_p} = \frac{0,035 \text{ g/L}}{2100 \text{ g/L}} \cong 1,67 * 10^{-5}$$

Suporemos ainda que $\bar{\rho}_{p0} = 60 \text{ g/L}$, logo:

$$\varepsilon_{pL} = \frac{\bar{\rho}_{pL}}{\rho_p} = \frac{60 \text{ g/L}}{2100 \text{ g/L}} \cong 0,0286$$

Com os referidos parâmetros estabelecidos e aplicando a metodologia aqui descrita, pode-se montar a tabela a seguir:

Tabela 3: Parâmetros do dimensionamento da área do decantador

Ensaio de decantação						
t (min)	z (cm)	dz(t)/dt	qi (cm/min)	zi (cm)	epi	D (m)
0	27,3	-0,2451	0,2451	27,3000	0,0000167	174,5138
2	26,7	-0,2495	0,2495	27,1991	0,0000168	172,6340
4	26,5	-0,2533	0,2533	27,5130	0,0000166	172,3485
8	26,0	-0,2585	0,2585	28,0683	0,0000162	172,2940
10	25,5	-0,2601	0,2601	28,1010	0,0000162	171,8766
14	24,2	-0,2611	0,2611	27,8548	0,0000164	170,8065
16	23,5	-0,2605	0,2605	27,6674	0,0000165	170,4261
18	23,0	-0,2591	0,2591	27,6645	0,0000165	170,8508
22	21,5	-0,2543	0,2543	27,0955	0,0000168	170,6709
26	20,5	-0,2467	0,2467	26,9132	0,0000169	172,7229
28	20,0	-0,2417	0,2417	26,7687	0,0000170	174,0025
30	19,6	-0,2361	0,2361	26,6830	0,0000171	175,7861
34	18,9	-0,2227	0,2227	26,4704	0,0000172	180,2906
36	18,6	-0,2149	0,2149	26,3350	0,0000173	183,0631
38	18,1	-0,2063	0,2063	25,9409	0,0000176	185,4001
40	17,7	-0,1971	0,1971	25,5840	0,0000178	188,3853
42	17,3	-0,1871	0,1871	25,1599	0,0000181	191,7226
44	17,0	-0,1765	0,1765	24,7642	0,0000184	195,8791
48	16,4	-0,1529	0,1529	23,7411	0,0000192	206,0055
52	15,8	-0,1265	0,1265	22,3801	0,0000204	219,8827
56	15,2	-0,0973	0,0973	20,6466	0,0000221	240,8849
60	14,9	-0,0651	0,0651	18,8060	0,0000242	280,9852
64	14,3	-0,0301	0,0301	16,2238	0,0000281	384,0254

Fonte: o autor

Como se pode constatar da Tabela 2, o diâmetros do decantador não parou de aumentar a partir dos dezesseis minutos. Podemos notar e grande diferença entre a curva de sedimentação obtida e a esperada para a aplicação do método de Kynch, que aparece na Figura 5. Esses dados mostram que o ensaio de sedimentação sofreu influência de fatores que comprometeram seus resultados, inviabilizando a determinação correta da área do decantador, e posteriormente a determinação de sua altura.

Os valores obtidos para a área não pararam de crescer pelo fato de a concentração volumétrica das partículas não terem atingido o valor de projeto, que foi de 0,0174. O valor máximo que foi obtido dentro do intervalo de 64 minutos que durou o ensaio foi de 0,0065.

O efeito predominantemente responsável pelos resultados incorretos obtidos no ensaio de sedimentação foi o efeito de parede (CREMASCO, 2012). Como o ensaio foi realizado em uma proveta de 250 mL, que possui pequeno diâmetro, a fração de partículas em contato direto com o vidro da proveta foi muito grande, dificultado assim a sedimentação efetiva do material particulado, interferindo na obtenção de dados acurados pela metodologia de Kynch, que desconsidera o efeito de parede.

4.4. Discussões

A partir dos dados obtidos nos ensaios de caracterização da água e dos resultados do ensaio de sedimentação com finalidade de realizar o projeto do decantador, pode-se fazer várias considerações.

Primeiramente, serão abordados os resultados dos ensaios de alcalinidade, comparando-se os resultados e ponderando a respeito da ação do coagulante.

A alcalinidade da água bruta é elevada. Levando-se em consideração que a mesma é proveniente de um açude, e sabendo-se que o mesmo passa por constante processo de perda de sua massa d'água por evaporação, acarretando no aumento da concentração dos compostos existente em seu interior, fica claro que os altos níveis não só de alcalinidade, mas também dos outros parâmetros que em breve serão abordados, são decorrentes desse processo.

As doses 1 e 2 referidas na Tabela 1 são as concentrações de coagulante que foram utilizadas, a saber: $(C_{coag})_1 = 1,25 \text{ mg/L}$ e $(C_{coag})_2 = 6,25 \text{ mg/L}$. Como pode-se notar, através dos experimentos de alcalinidade, o coagulante teve uma ação não muito considerável, sendo uma redução de apenas 2,9% para a dose 1 e de 4,5% para a dose 2.

Passando para a análise da concentração de cloretos presente na água, podemos notar o alto valor desse parâmetro na água bruta. Isso revela o caráter altamente salino da amostra. Esse fato pode ser suficientemente explicado e compreendido pelo efeito da perda mássica do corpo d'água. Nesse ensaio a ação do coagulante foi mais expressiva, especialmente quando em maior concentração (dose 2). Ocorreu uma redução de 40% com a utilização da dose 1 e de 42% para a dose 2. O coagulante teve ação intensa sobre os íons carregados das substâncias salinas por desestabilização e neutralização do potencial zeta, explicando os expressivos resultados do ensaio de determinação do teor de cloretos.

A análise de dureza total mostrou que a amostra de água bruta possui alta dureza, sendo considerada como água muito dura, como era de se esperar. Esse elevado valor pode ser compreendido pelo mesmo fenômeno já citado. A ação do coagulante em ambas as doses foi a mesma, gerando uma redução considerável, embora não tão expressiva quanto no ensaio de cloretos, mas importante, ocorrendo uma redução de 14% na dureza total.

A análise de turbidez mostrou certa turbidez da água bruta. Embora a mesma não fosse tão perceptível a olho nu, o coagulante teve ação muito expressiva nessa análise. A dose 1 gerou uma redução de turbidez de 66%, enquanto a dose 2 gerou uma redução de 69%.

As análises de condutividade acabaram por corroborar nossa ideia inicial de que a água bruta é altamente salina, pois foram constatados valores que confirmam esse fato.

A água bruta apresentou condutividade de $12,71 \text{ mS/cm}$, enquanto as amostras tratadas com os coagulantes 1 e 2 apresentaram os valores $12,85$ e $12,86 \text{ mS/cm}$, respectivamente. O coagulante, por algum mecanismo, acabou por promover um meio melhor condutor que a água bruta, embora que os valores de sua concentração possam não ter gerado resultados muito diferentes.

As análises de pH mostraram que a água bruta tem caráter alcalino, corroborando assim nossa conclusão obtida através dos ensaios de alcalinidade, sendo o valor de pH igual a $7,82$. Os resultados obtidos nos valores de pH para as doses 1 e 2 foram, respectivamente $7,33$ e $7,40$. A ação do coagulante frente ao pH do meio não foi tão expressivo ou considerável.

O ensaio de sólidos sedimentáveis revelou que não haviam tantos sólidos sedimentáveis por ação gravitacional. O valor do referido parâmetro para a água bruta foi de $0,10 \text{ mL/L}$. Para as doses 1 e 2, foram obtidos os valores de $0,08 \text{ mL/L}$ e $0,07 \text{ mL/L}$, respectivamente. O presente resultado mostra que a água bruta não possui suspensão suficiente para a formação de flocos grandes e numerosos.

4. Conclusão

De toda a exposição de ideias e metodologias, bem como de resultados e explicações dos mesmos, pode-se fazer algumas considerações.

Com relação às análises da amostra da água do açude, foi possível constatar que as concentrações que foram empregadas do coagulante policloreto de alumínio 18% não foram suficientes para a remoção dos sólidos presentes na água. Pelos dados das análises, podemos perceber que a mesma, mesmo após o tratamento, continuou apresentando elevados índices de alcalinidade, dureza total e não alterou significativamente o pH. Os resultados de turbidez foram mais notáveis, atingindo a remoção de turbidez mostrada na seção de discussões.

Abordando agora o projeto de decantador, não foi possível realizar a determinação da área de um decantador que pudesse ser instalado em uma estação de tratamento de água que porventura fosse instalada nas proximidades do açude. Como o ensaio de sedimentação foi realizado em uma proveta com pequeno diâmetro, o efeito de parede foi muito pronunciado, dificultando a livre sedimentação das partículas e inviabilizando a aplicação da metodologia de Kynch, pois a mesma não leva em consideração as consequências do efeito de parede.

5. Referências

SILVA, Ana et al. Monitoramento da qualidade da água: Açude Itans, Gargalheiras e Boqueirão. Natal, 2013.

BRAGA, Benedito et al. Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

MACÊDO, J. A. B. DE. Águas & Águas. Livraria Varela. Editô - São Paulo, 2001.

LIBÂNIO, Marcelo. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. 3.ed. São Paulo: Átomo, 2010. 494 p.

RICHTER, Carlos A. Água: Métodos e Tecnologias de Tratamento. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2009. 340 p.

CREMASCO, Marco A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. São Paulo: Blucher, 2012. 423 p.

DAMASCENO, J.J.R. Sedimentação de partículas em campo gravitacional. In: Tópicos especiais de sistemas particulados, v. 4. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1998.

ADEODATO, Sérgio. Poluição e Desperdício Reduzem a Água Disponível no Brasil. Disponível em < http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/ambiente/conteudo_345578.shtml>. Acesso em 22 de setembro de 2016.

#luis.blog.br, População do Brasil, Estados e Regiões Brasileiras – Dados do IBGE. Disponível em < <http://www.luis.blog.br/populacao-do-brasil-estados-e-regioes-dados-do-ibge.aspx>>. Acesso em 22 de setembro de 2016.