



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
(SANEAMENTO AMBIENTAL)

ANTONIA SAMYLLA OLIVEIRA ALMEIDA

MODELAGEM HIDRÁULICA DE FLOCULADOR DE PLACAS DE ORIFÍCIOS

FORTALEZA

2016

ANTONIA SAMYLLA OLIVEIRA ALMEIDA

MODELAGEM HIDRÁULICA DE FLOCULADOR DE PLACAS DE ORIFÍCIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto

Coorientador: Dr. Manoel do Vale Sales

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A444m Almeida, Antonia Samylla Oliveira.
Modelagem Hidráulica de Floculador de Placas de Orifícios / Antonia Samylla Oliveira Almeida. –
2016.
91 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. José Capelo Neto.
Coorientação: Prof. Dr. Manoel do Vale Sales.

1. Floculador de placas. 2. coeficientes de descarga. 3. relação X/S. I. Título.

CDD 628

ANTONIA SAMYLLA OLIVEIRA ALMEIDA

MODELAGEM HIDRÁULICA DE FLOCULADOR DE PLACAS DE ORIFÍCIOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto

Coorientador: Dr. Manoel do Vale Sales

Aprovada em: ____/____/____.

Prof. Dr. José Capelo Neto (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)

Dr. Manoel do Vale Sales (Coorientador)

Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro (Examinador interno)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)

Às minhas mães Lindinalva, Vera e Lídia
companheiras de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que mesmo durante essa fase de aridez espiritual, me fortaleceu, proporcionando momentos de serenidade quando as tribulações me enfraqueciam.

À minha mãe Lindinalva Oliveira Maia, pela vida doada e pelo amor incondicional em todos os instantes, em especial pelo apoio, paciência e cuidados durante todo mestrado e em especial na produção deste trabalho.

À minha irmã Sabryna Andressa, pelo apoio e ajuda durante nossa caminhada e principalmente no decorrer da execução deste trabalho.

Ao meu amado avô Lindomar Maia dos Santos (*in memoriam*), representante da figura paterna em minha vida, sempre me cobrindo de amor e me agraciando com ensinamentos preciosos que carregarei por toda minha vida. Guardado sempre em minha mente e em meu coração.

À minha família, em especial as minhas mães de sangue e coração, mãe Nalva, mãe Vera e tia Lídia, que nunca mediram esforços para me ajudar a vencer cada etapa da minha vida.

Às minhas duas famílias Almeida Rodrigues e Pinheiro Maia, não sendo possível citar cada um, mas agradecendo imensamente por cada cuidado, oração, apoio, carinho e presença em todos os momentos.

Ao meu namorado Marlon Vieira de Lima, pelo amor, paciência, companheirismo, apoio, pelas contribuições preciosas e horas dedicadas em me auxiliar ao longo de toda produção deste trabalho e pelas horas de desabafo e consolo.

Ao Dr. José Capelo Neto, pela orientação deste trabalho e pelas contribuições preciosas para o meu futuro profissional.

Ao Dr. Manoel Sales, pelo acolhimento e pelas várias horas dedicadas a orientação deste trabalho, contribuindo com seus ensinamentos técnicos e de vida, pelas conversas enriquecedoras e construtivas e pelos momentos de descontração.

À Companhia de Água e Esgoto do Ceará, por disponibilizar sua estrutura para realização desta pesquisa.

À Equipe técnica da ETA Gavião, em especial as pessoas que dedicaram parte de seu tempo para me auxiliar em ações fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, são eles: Mário Teóphilo, João Batista, César Motta, João, Daniel Queiroz, José Valter, Francione, Belarmino, Miguel, Ademir, Isabel Freitas, Larissa Silvino, minha gratidão pelo apoio e dedicação.

Ao colega Stanley Queiroz, pela paciência ao me auxiliar no desenvolvimento da metodologia para o tratamento dos registros fotográficos, fase crucial para a continuidade do trabalho e pelos ensinamentos sobre o *Autocad*[®], fundamentais para que pudesse concluir com sucesso esta etapa do projeto.

Aos meus companheiros de luta, Luciane e Diego, com quem mesmo na correria da produção de nossos trabalhos e com todas as dificuldades, compartilharam comigo bons momentos de descontração e leveza.

A todos os colegas com quem compartilhei disciplinas, pela união e luta para alcançarmos nossos objetivos durante esta fase.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, em especial aqueles com que tive a oportunidade de compartilhar conhecimento e que contribuíram com suas experiências para o meu desenvolvimento intelectual e profissional.

À FUNCAP por disponibilizar a bolsa, fundamental para que pudesse me dedicar exclusivamente à construção deste sonho.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

"Outra lição que se pode tirar destas considerações é que a vida sem sonhos é muitíssima mais fácil. Sonhar custa caro. E não digo só em moeda corrente do País, mas daquilo que forma a própria substância dos sonhos. "

Rachel de Queiroz

RESUMO

O estudo do comportamento do escoamento de água através de orifícios tem sido muito útil para a descrição do funcionamento e projeto de importantes estruturas hidráulicas, como reservatórios e Estações de Tratamento de Água (ETAs). Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo hidráulico que possibilita a determinação de dois parâmetros hidráulicos essenciais para o dimensionamento de flocladores de placas: o coeficiente de descarga (C_d) e a relação $\frac{X}{S}$. Como resultado desta pesquisa foi possível apresentar uma equação que correlaciona o número de Reynolds (entre 4.000 e 18.000) com o C_d , equação está ainda inédita na literatura atual. Outro ponto importante encontrado foi que a média populacional de C_d em diversas condições hidráulicas foi de 0,758, contrário ao divulgado pela literatura anterior (0,61) e próxima do valor divulgado na literatura mais atual. Encontrou-se também uma correlação e uma equação correlacionando o parâmetro $\frac{X}{S}$ com número de Reynolds. A faixa de número de Reynolds utilizada neste novo modelo coincide em parte com a faixa trabalhada pelo único modelo até agora existente Di Bernardo & Giorgetti (1980, p. 528– 533). As diferenças entre os valores de $\frac{X}{S}$ obtidos por ambos os modelos, resultam numa significativa diferença entre os valores do alcance dos jatos, e conseqüentemente do dimensionamento do floclador. Finalmente, utilizou-se os modelos desenvolvidos no dimensionamento de um floclador de placas composto de três câmaras, com capacidade de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, parte integrante de um sistema de floco-flotação.

PALAVRAS-CHAVE: Floclador de placas; coeficiente de descarga; relação $\frac{X}{S}$.

ABSTRACT

The history of the behaviour of water flowing through orifices has been very useful to describe function and design of important hydraulic structures, like reservoirs and Water Treatment Plants. This work presents the development of a hydraulic model that allows determination of two hydraulic parameters essential to dimensioning plate flocculators: the discharge coefficient (C_d) and the relation $\frac{x}{s}$. As a result of this research, it was possible to present an equation that correlates the Reynolds number (between 4000 and 18000) with the discharge coefficient, this equation is still unpublished in today's literature. Another important point found was that the population average of C_d in many hydraulic conditions was 0.758, different of what had been previously published (0.61) and close to the value published at the current literature. It was also found a correlation and an equation correlating the $\frac{x}{s}$ parameter with the Reynolds number. The range of Reynolds numbers in this new method matches partially the range obtained by the only model currently existing Di Bernardo and Giorgetti (1980, p. 528– 533). The differences between the values of $\frac{x}{s}$ obtained by both models result in a significant difference between the range of the jets and, consequently, the dimensioning of the flocculator. Finally, it were used the models developed to dimension a plates flocculator composed of three chambers, with $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ of capacity, integrant part of a flocs-flotation system.

KEY WORDS: plates flocculator; discharge coefficient; relation $\frac{x}{s}$.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Jato formado pela passagem de um fluido através de um orifício circular	20
Figura 2 - Classificação dos orifícios quanto ao tipo de escoamento.....	21
Figura 3 - Classificação de orifícios quanto à natureza da parede	21
Figura 4 – Gradiente de velocidade.....	22
Figura 5 - Cortina distribuidora de água floculada em decantadores contendo orifícios.....	24
Figura 6 – Variação de X/S em relação ao número de Reynolds	27
Figura 7 - Determinação experimental do coeficiente de velocidade	29
Figura 8 - Representação da <i>vena contracta</i>	30
Figura 9 - Tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano.	35
Figura 10 - Agregação de partículas e formação de flocos no processo de floculação.....	36
Figura 11 - Movimento browniano de partículas	38
Figura 12 - Modelo matemático proposto por Smolowchowski para floculação ortocinética.	40
Figura 13 - Floculador mecanizado do tipo paletas de eixo vertical	48
Figura 14 – Floculador mecanizado do tipo paletas de eixo horizontal	48
Figura 15 - Floculador do tipo turbina	49
Figura 16 - Floculador em meio poroso ou granular	50
Figura 17 - Floculador hidráulico do tipo chicanas horizontais.....	51
Figura 18 - Floculador hidráulico do tipo chicanas verticais	52
Figura 19 - Floculador hidráulico do tipo Cox, (a) planta baixa (b) seção longitudinal-AA ...	53
Figura 20 - Floculador de fluxo helicoidal, (a) Planta baixa (b) Secção transversal.....	53
Figura 21 - Floculador Alabama, (a) Planta baixa (b) Secção longitudinal.	54
Figura 22 - Floculador hidráulico do tipo bandejas perfuradas.....	56
Figura 23 – Equipamento floco-flotador por ar dissolvido	57
Figura 24 - FFAD atuando no tratamento de ALF	58
Figura 25 - FFAD atuando no tratamento de efluentes oriundos de lagoa de estabilização ...	58
Figura 26 - Detalhe do suporte para placas.	60
Figura 27 - Esquema das atividades realizadas ao longo da pesquisa.....	61
Figura 28 - Aparato instrumental para a determinação da perda de carga	63
Figura 29 – Sistema de inserção de corante no FFAD	64

Figura 30 – Fluxograma das fases de registro do comportamento e alcance dos jatos	65
Figura 31 - Fluxograma de procedimentos para tratamento de registros fotográficos.....	66
Figura 32 - Gráficos boxplot do coeficiente de descarga correlacionados com o número de Reynolds para o orifício inferior e superior.....	71
Figura 33 - Modelo proposto para determinação de coeficiente de descarga após a remoção de outliers	73
Figura 34 - Gráficos dos resíduos do modelo de determinação de coeficiente de descarga. ...	74
Figura 35 - Gráfico de probabilidade normal	74
Figura 36 – Registro fotográfico de um jato.....	76
Figura 37 – Geratrizes dos cones delineadas no AutoCad®	76
Figura 38 – Representação gráfica das geratrizes do cone.....	77
Figura 39 - Modelo para determinação da relação $\frac{X}{S}$ com presença de outliers.....	79
Figura 40 - Modelo para a determinação da relação $\frac{X}{S}$ após a remoção de outliers.....	81
Figura 41 - Gráfico dos resíduos do modelo para a determinação da relação $\frac{X}{S}$	81
Figura 42 - Gráfico da probabilidade normal.	82
Figura 43 - Curva dos modelos de determinação de $\frac{X}{S}$ em função de Reynolds para orifícios	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente de velocidade para orifícios circulares de parede delgada.	29
Tabela 2 – Valores do coeficiente de contração para orifícios circulares de parede delgada.	30
Tabela 3 – Valores do coeficiente de descarga para orifícios circulares, verticais de parede delgada.....	31
Tabela 4 – Comparação de valores práticos de coeficiente de descarga.....	32
Tabela 5 – Tratamento necessário para as classes de águas doces segundo a resolução CONAMA 357.....	33
Tabela 6 – Classificação das águas naturais para abastecimento público segundo a NBR 12.216.....	34
Tabela 7 – Principais parâmetros de projeto de unidades de floculação.....	43
Tabela 8 – Principais vantagens e desvantagens de floculadores do tipo Alabama.....	55
Tabela 9 – Parâmetros utilizados para a avaliação de eficiência do FFAD e percentual de remoção.....	59
Tabela 10 – Determinação do tempo de estabilização da carga.....	69
Tabela 11 – Condições hidráulicas e coeficientes de descarga obtidos no estudo.....	70
Tabela 12 – Análise de Z score para os dados de coeficiente de descarga.....	72
Tabelas 13 – Coordenadas X e Y das geratrizes de um cone.....	77
Tabela 14 – Determinação dos valores de S e $\frac{X}{S}$	78
Tabela 15 – Valores de $\frac{X}{S}$ em função de Re	78
Tabela 16 – Verificação de outliers pelo critério Z score.....	80
Tabela 17 – Dimensionamento de um floculador de placas utilizando os modelos de por Di Bernardo & Giorgetti (1980, p. 535) e Almeida (2016) e coeficiente de descarga 0,758.....	84
Tabela 18 – Dimensionamento de um floculador de placas utilizando os modelos de por Di Bernardo & Giorgetti (1980, p. 535) e Almeida (2016) e coeficiente de descarga 0,61.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALF	Água de lavagem dos filtros
A_1	Área do orifício [L^2]
A_2	Área da secção contraída [L^2]
C_c	Coefficiente de contração
C_d	Coefficiente de descarga ou de vazão
C_v	Coefficiente de velocidade
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	Diâmetro do orifício [L]
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAD	Flotação por ar dissolvido
FFAD	Floco-flotador por ar dissolvido
FPO	Floculador de placas de orifícios
FUMEC	Universidade Fundação Mineira de Educação e Cultura
G	Gradiente de velocidade [T^{-1}]
$G.t_f$	Número de Camp
h	Carga [L]
MON	Matéria orgânica natural
MS	Ministério da Saúde

NBR	Norma Brasileira
N_{ij}	Taxa de colisão
R_e	Número de Reynolds
S	Espaçamento entre os jatos [L]
s	segundo
U	Velocidade média de passagem de água através do orifício [LT^{-1}]
UFC	Universidade Federal do Ceará
V_r	Velocidade real [LT^{-1}]
V_t	Velocidade teórica [LT^{-1}]
X	Distância de alcance dos jatos [L]
$\frac{X}{S}$	Relação entre a distância entre os jatos adjacentes formados e o espaçamento entre os jatos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Orifícios.....	20
3.1.1 Variáveis hidráulicas aplicadas a orifícios	22
3.1.2 Coeficientes hidráulicos	28
3.1.2.1 Coeficiente de velocidade	28
3.1.2.2 Coeficiente de contração	29
3.1.2.3 Coeficiente de descarga ou de vazão	31
3.2 Tratamento de água para abastecimento humano.....	32
3.2.1 Tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano.....	32
3.3 Floculação.....	36
3.3.1 Mecanismos de floculação.....	37
3.3.1.1 Floculação pericinética.....	38
3.3.1.2 Floculação ortocinética.....	39
3.3.1.3 Sedimentação diferencial.....	41
3.3.2 Mecanismos de agregação e ruptura dos flocos	42
3.3.3 Fatores que interferem na floculação.....	43
3.3.3.1 Tempo de detenção.....	44
3.3.3.2 Gradiente de velocidade	45
3.3.3.3 Compartimentação da unidade de floculação.....	45
3.3.4 Tipos de unidades de floculação.....	46
3.3.4.1 Unidades mecânicas	47
3.3.4.1.1 Flocladores de paletas.....	48
3.3.4.1.2 Flocladores de turbina	49
3.3.4.2 Unidades hidráulicas	49
3.3.4.2.1 Floclador em meio poroso ou granular.....	50
3.3.4.2.2 Flocladores de chicanas	51
3.3.4.2.3 Flocladores do tipo Cox.....	52
3.3.4.2.4 Flocladores de escoamento helicoidal	53

3.3.4.2.5 Floculadores tipo Alabama.....	54
3.3.4.2.6 Floculadores de bandejas perfuradas.....	55
3.4 Floco-flotador por ar dissolvido.....	56
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	60
4.1 Escolha dos diâmetros dos orifícios e confecção das placas utilizadas.....	62
4.2 Determinação do coeficiente de descarga.....	62
4.3 Registro do comportamento e alcance dos jatos.....	64
4.4 Tratamento dos registros fotográficos.....	66
4.5 Dimensionamento do floculador de placas.....	68
5 RESULTADOS E DISCURSÕES.....	69
5.1 Determinação do coeficiente de descarga.....	69
5.2 Determinação da distância do ponto de encontro dos jatos.....	75
5.3 Dimensionamento do floculador de placas.....	83
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS.....	89

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da intensificação do processo de eutrofização e dos efeitos das mudanças climáticas um grande número de ETAs no estado do Ceará vem apresentando sérias dificuldades em realizar a potabilização das águas captadas nos corpos hídricos superficiais. As ETAs vêm buscando formas de se readequar aos graves problemas ocasionados pelo decréscimo da qualidade das águas captadas em reservatórios que apresentam, principalmente, alto grau de trofia, alta densidade algal e cor verdadeira elevada.

A tecnologia de ciclo completo, por exemplo, que faz uso de decantadores, apresenta limitações para o tratamento de águas muito eutrofizadas, pois os flocos formados pela aglutinação da matéria suspensa e coloidal são, em geral, mais leves e maiores, fatores estes que dificultam a sedimentação.

Além de limitações operacionais, é muito comum a ocorrência de problemas como: elevado consumo de produtos químicos, colmatação do leito filtrante, dificuldade em atingir o padrão de turbidez estipulado na legislação vigente, presença de precursores de subprodutos da desinfecção, possibilidade de liberação de toxinas de cianobactérias, presença de sabor e odor, dentre outros.

Em alternativa às tecnologias empregadas no processo de potabilização de águas para consumo humano e visando reduzir as dificuldades apresentadas, outras configurações como ciclo completo com flotação, floto-filtração e dupla filtração já são empregadas em algumas ETAs em diversos países. Nesse contexto, a presente pesquisa apresenta uma contribuição, desenvolvida a partir do estudo sobre o comportamento hidráulico de placas de orifícios, componentes de um floculador que, associado à flotação, compõem uma unidade integrada denominada de floco-flotador por ar dissolvido (FFAD). Tal arranjo, constitui uma alternativa compacta que se mostrou eficaz no tratamento de águas oriundas de efluentes de ETAs e de lagoas de estabilização em ensaios realizados em escala piloto. Por ser um equipamento recentemente desenvolvido, não há ainda modelos hidráulicos específicos para essa unidade de tratamento que permitam o dimensionamento do mesmo em escala real, razão pela qual o presente trabalho enfatizou a elaboração de modelos que permitem a determinação dos parâmetros hidráulicos coeficiente de descarga e da razão $\frac{X}{S}$ (relacionada às dimensões dos cones formados pela passagem do líquido pelos orifícios). Nos modelos desenvolvidos, C_d e $\frac{X}{S}$

estão relacionados ao número de Reynolds, sendo ambos os parâmetros necessários para a determinação do gradiente de velocidade na unidade de floculação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a modelagem hidráulica de um floculador de placas de orifícios, de forma a possibilitar o dimensionamento do mesmo em conjunto com a flotação por ar dissolvido (FAD), proporcionando o *up-scaling* da unidade em escala piloto para a escala real.

2.2 Objetivos Específicos

- I. Desenvolver e aplicar uma metodologia para correlacionar os valores de C_d e $\frac{x}{S}$ com o número de Reynolds em placas de orifícios;
- II. Investigar o coeficiente de descarga em variadas condições hidráulicas, comparando-o com os valores apresentados na literatura.
- III. Modelar matematicamente o alcance do jato e verificar seus efeitos sobre o gradiente de velocidade;
- IV. Dimensionar um floculador de placas de orifícios, utilizando o modelo obtido neste estudo e compará-lo com o modelo proposto anteriormente.

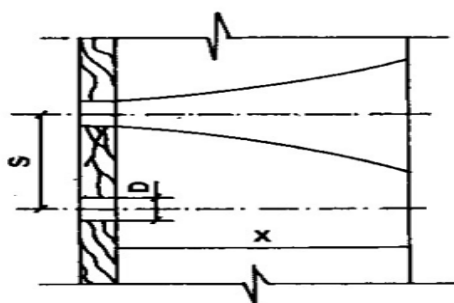
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Orifícios hidráulicos

Muitas são as aplicações dos orifícios em projetos hidráulicos, tais como, em sistemas de irrigação, estações de tratamento de água (cortinas de distribuição de água em decantadores, aplicação de produtos químicos na mistura rápida, etc), medição de vazões em tanques e canalizações, dentre outras.

Um orifício hidráulico consiste em uma abertura de perímetro fechado, de forma geométrica definida, realizada na parede ou fundo de um reservatório ou na parede de um canal ou conduto em pressão, pela qual o líquido em repouso ou movimento escoar em virtude da energia que possui (PORTO, 2006, p. 351). A figura 1 ilustra um jato formado a partir da passagem de um líquido por um orifício.

Figura 1 - Jato formado pela passagem de um fluido através de um orifício circular.

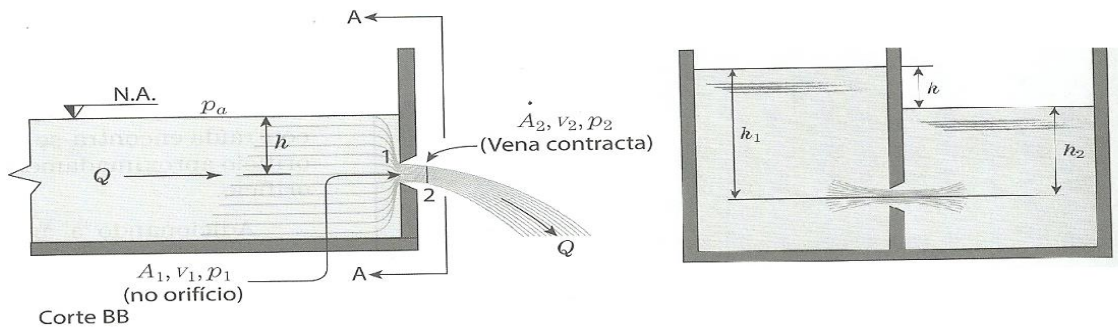


Fonte: Vianna (2002, p. 340).

Vários critérios podem ser utilizados para a classificação dos orifícios. Quanto à sua geometria, quanto às dimensões, quanto à natureza da parede, quanto à orientação do plano do orifício, quanto ao escoamento do líquido pelo orifício, entre outros. De acordo com a forma geométrica do seu perímetro, os orifícios podem ser classificados em: circulares, retangulares, triangulares, etc.

Quanto à condição de escoamento, os orifícios são classificados como orifícios com descarga livre, aqueles que não encontram resistência do líquido e escoam em queda livre. E em orifícios com descarga afogada ou submersos, aqueles que encontram resistência da massa líquida. Ambos se encontram representados na figura 2.

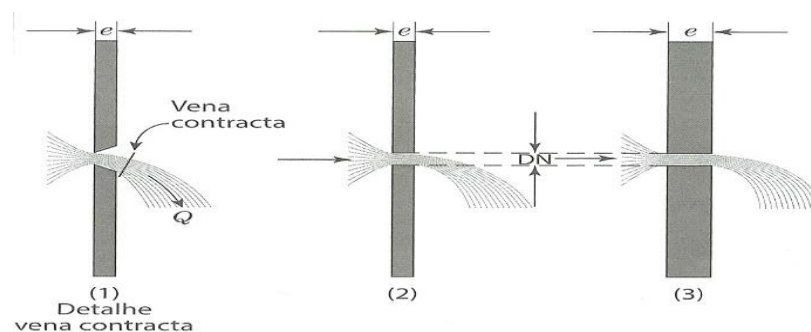
Figura 2 - Classificação dos orifícios quanto ao tipo de escoamento.



Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 73-77).

Quando classificados quanto à natureza da parede, os orifícios podem ser de parede delgada ou fina e de parede grossa ou espessa. Orifícios de parede delgada são aqueles em que o líquido toca o perímetro da abertura apenas em uma linha. Já o orifício de parede espessa o líquido se adere à parede. Os orifícios em parede delgada são obtidos em chapas finas ou pelo corte bisel. O acabamento em bisel não é necessário se a espessura e da chapa ou parede é inferior a 1,5 vezes o diâmetro d do orifício suposto circular ou à menor dimensão, se o orifício tiver outra forma (AZEVEDO NETTO, 2015, p. 74). Quando a parede no contorno do orifício não tem arestas afiladas, o orifício é de parede grossa e permite que o jato, após passar a seção contraída, tenha espaço para se expandir e chegar a ocupar a totalidade da seção (PORTO, 2006, p. 365). A figura 3 apresenta os orifícios de acordo com a classificação quanto à natureza da parede.

Figura 3 – Classificação de orifícios quanto à natureza da parede¹.



Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 74).

¹ (1) Parede delgada biselada; (2) Parede delgada com $e < 1,5 DN$; (3) Parede espessa com $e > 1,5 DN$.

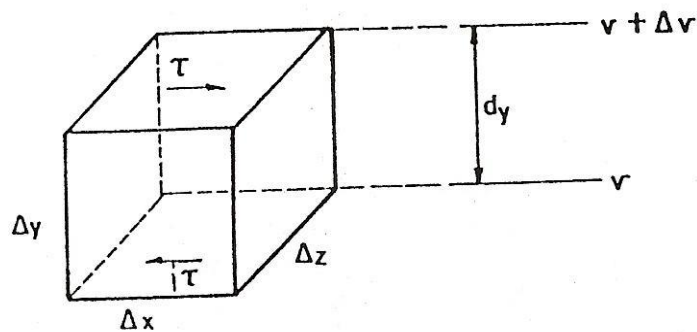
3.1.1 Variáveis hidráulicas aplicadas a orifícios.

O grau de agitação aplicado durante a mistura rápida (no processo de coagulação) ou durante a mistura lenta (na floculação) é normalmente expresso pelo gradiente de velocidade (G). Conceitualmente, o gradiente de velocidade é o limite da relação entre a diferença de velocidade Δv com que se movem duas camadas ^[2] de fluido muito próximas e a distância ^[3] ΔY entre si, apresentado na equação 1 (RICHTER, 2009, p. 103):

$$G = \lim_{\Delta Y \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta Y} = \frac{dv}{dY} \quad (1)$$

Consideremos a porção da massa líquida confinada no elemento de volume ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Gradiente de velocidade.



Fonte: RICHTER & AZEVEDO NETTO (1991, p. 55).

Levando em conta que quando a referida porção é submetida a uma agitação (hidráulica ou mecânica) a potência dissipada é dada pela equação 2.

$$P = \tau \cdot A \cdot \Delta v \quad (2)$$

Uma vez que $A = \Delta X \cdot \Delta Z$, temos que:

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \quad (3)$$

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Z \cdot \Delta v \cdot \frac{\Delta Y}{\Delta Y}$$

² Paralelas

³ Perpendicular às camadas

$$P = \tau \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta Z \cdot \frac{\Delta v}{\Delta Y}$$

$$P = \tau \cdot V \cdot \frac{\Delta v}{\Delta Y}$$

Sendo τ , para fluídos Newtonianos:

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta v}{\Delta Y} \quad (4)$$

Substituindo:

$$P = \mu \cdot \frac{\Delta v}{\Delta Y} \cdot V \cdot \frac{\Delta v}{\Delta Y}$$

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

Considerando, $\frac{\Delta v}{\Delta Y} = G$, teremos:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \quad (5)$$

Na qual:

τ : Tensão de cisalhamento ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$);

A: Área (m^2);

P: Potência dissipada na massa líquida (W);

G: Gradiente de velocidade (s^{-1});

μ : Viscosidade absoluta da água ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$);

V: Volume (m^3).

Para unidades hidráulicas de floculação, tendo em vista que a potência dissipada é dada por $\gamma \cdot Q \cdot h_f$, o gradiente de velocidade é calculado utilizando a equação 6:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot Q \cdot h_f}{\mu \cdot V}} \quad (6)$$

Onde:

γ : Peso específico da água à dada temperatura ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$);

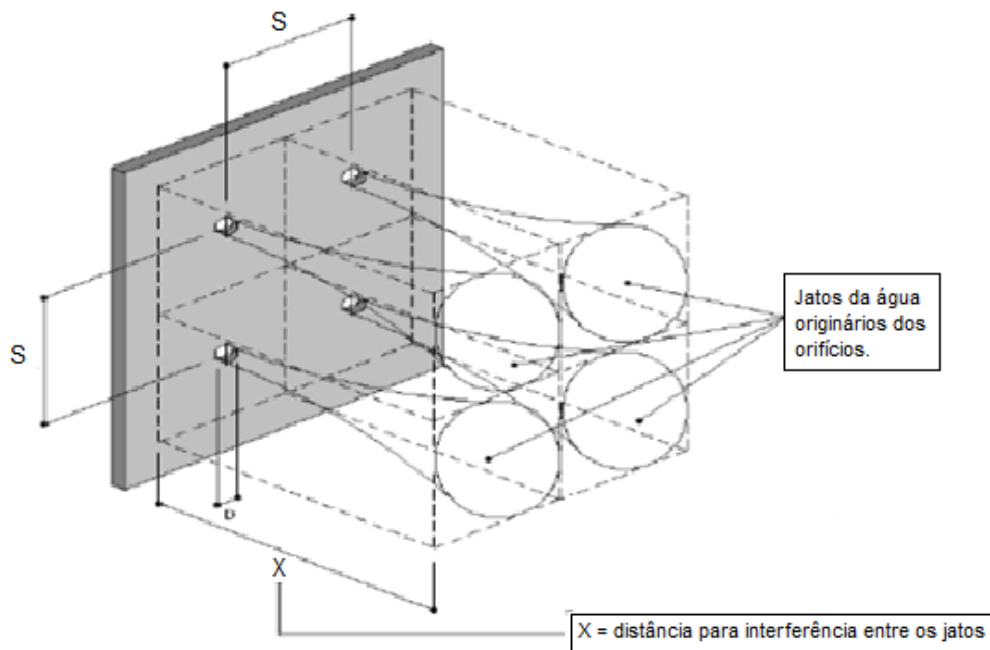
h_f : Perda de carga (m);

Q : vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Vianna (2002, p. 338) estabeleceu um modelo para o cálculo do gradiente de velocidade em cortina de orifícios utilizada na distribuição de água floculada em decantadores, a partir da equação geral para cálculo de gradiente de velocidade, formulada por Camp e Stein.

A cortina distribuidora utilizada no modelo contém orifícios de diâmetro D , espaçadas entre si, de uma distância S . Sendo X a distância entre os jatos adjacentes formados, conforme mostrado na figura 5:

Figura 5 – Cortina distribuidora de água floculada em decantadores contendo orifícios.



Fonte: Vianna (2002, p.339).

Considerando o paralelepípedo de base ($S \times S$) e altura X , teremos o volume apresentado na equação 7:

$$V = S^2 \cdot X \quad (7)$$

Sendo:

V: volume do paralelepípedo;

S: espaçamento entre os eixos de dois orifícios adjacentes (m);

X: distância percorrida pelos jatos até que haja interferência entre eles (m).

A carga a montante do orifício representa a energia potencial que será convertida em energia cinética ao longo da passagem do fluido pelo orifício. Ao passar pelos orifícios, o líquido perde parte da energia que apresentava a montante, sendo essa perda de energia denominada de perda de carga (h). De acordo com Porto (2006, p. 356), a perda de energia é produto das resistências passivas devidas à viscosidade do líquido e à parede do depósito e pelo próprio ar. A equação 8, obtida a partir da equação 16, expressa uma forma simples de calcular a perda de carga resultante da passagem de um líquido por um orifício.

$$h = \left(\frac{U}{C_d}\right)^2 \cdot \frac{1}{2g} \quad (8)$$

Onde:

h: perda de carga imposta pelo orifício (m);

U: velocidade média de passagem de água através do orifício ($m \cdot s^{-1}$);

C_d : coeficiente de descarga do orifício;

g: aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$).

Partindo da equação 6, a seguir será apresentado a dedução da equação de gradiente de velocidade aplicada para placas contendo orifícios.

O termo Q, componente da equação 6, corresponde a vazão. Esta será substituída pela equação da continuidade (equação 9).

$$Q = U \cdot A \quad (9)$$

Assim:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot U \cdot A \cdot h_f}{\mu \cdot V}}$$

Substituindo as variáveis V e h_f pelas equações 7 e 8, apresentadas anteriormente, teremos:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot U \cdot A}{\mu \cdot S^2 \cdot X \cdot 2g} \left(\frac{U}{C_d}\right)^2}$$

Considerando:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (10)$$

E:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (11)$$

Teremos:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot U}{\mu \cdot S^2 \cdot X \cdot 2g} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{U}{C_d}\right)^2}$$

Por fim, substituindo o termo μ pelo produto $\rho \cdot \nu$, obtivemos:

$$G = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot U}{\rho \cdot \nu \cdot S^2 \cdot X \cdot 2g} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{U}{C_d}\right)^2}$$

Com isso, após as substituições e simplificações necessárias, o cálculo do gradiente de velocidade em orifícios passa a ser obtido utilizando a equação 12.

$$G = \frac{D}{S} \sqrt{\frac{\pi \cdot U^3}{8 \cdot \nu \cdot C_d^2 \cdot X}} \quad (12)$$

Onde:

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

D: diâmetro do orifício (m);

S: espaçamento entre os eixos de dois orifícios adjacentes (m);

U: velocidade média de passagem de água através do orifício ($m \cdot s^{-1}$);

ν : viscosidade cinemática da água ($m^2 \cdot s^{-1}$) a 25° C;

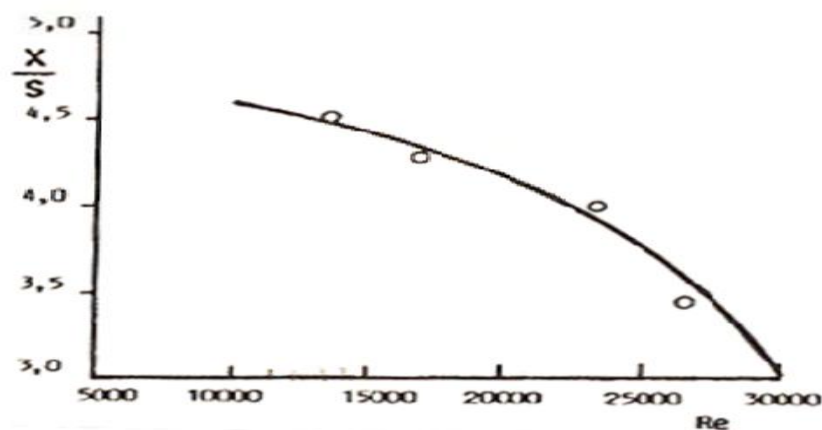
x: distância percorrida pelos jatos até que haja interferência entre eles (m).

Conforme relatos de Camp (1961, p. 244) em estudo realizado por Dempster (1934), foi observado o valor de X (distância necessária para a difusão uniforme) em uma

série de experiências usando corante. Neste estudo, a característica selecionada foi o gradiente de velocidade médio obtido a partir da suposição de que a carga do orifício H_0 é dissipada no volume de S^2X para cada orifício. Neste estudo, concluiu-se que o valor de $\frac{X}{S}$ parece depender, principalmente, da velocidade de passagem do fluido pelo orifício, que nestas experiências variou de 0,1 a 1,6 ft/s. Quando realizada uma comparação com a velocidade de passagem do fluido pelo orifício, verificou-se que o tamanho dos orifícios parece não ter qualquer influência sobre a razão de $\frac{X}{S}$.

Posteriormente, em estudos com cortinas distribuidoras de água floculada em decantadores, realizados por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 528– 533), foi verificado uma correlação entre o número de Reynolds e a distância de alcance dos jatos, conforme apresentado na figura 6.

Figura 6 – Variação de $\frac{X}{S}$ em relação ao número de Reynolds.



Fonte: VIANNA (2002, p. 340).

Camp (1961) *apud* Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 530), relatou que estudos realizados com orifícios hidráulicos corroboram as conclusões listadas a seguir:

- A relação $\frac{X}{S}$ parece depender somente da velocidade de passagem de água através do orifício;
- Quando a velocidade no orifício estiver compreendida entre 0,1 m/s e 0,3 m/s, o diâmetro do orifício não influi na relação $\frac{X}{S}$;
- Os jatos provenientes de orifícios consecutivos interferem um no outro a uma distância compreendida entre $2S$ e $3S$.

3.1.2 Coeficientes hidráulicos

Com o intuito de efetuar correções nos parâmetros hidráulicos, são adotados diversos coeficientes nas equações que descrevem o comportamento desses sistemas. Nos estudos realizados com orifícios hidráulicos são utilizados os coeficientes de velocidade, contração e descarga ou vazão, detalhados a seguir.

3.1.2.1 Coeficiente de velocidade

A razão entre a velocidade real (V_r) e a velocidade teórica (V_t) denomina-se coeficiente de velocidade (C_v), apresentado na equação 13.

$$C_v = \frac{v_r}{v_t} \quad (13)$$

A velocidade real dos jatos é menor que a velocidade teórica calculada a partir da fórmula de Torricelli mostrada na equação 14.

$$v_t = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (14)$$

Onde:

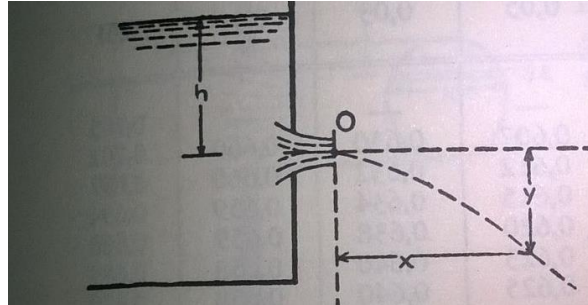
v_t : velocidade teórica ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

g : aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

h : perda de carga (m).

Esta diferença é ocasionada, entre outros motivos, pelas perdas de carga devidas à viscosidade do líquido e rugosidade do material que compõe o orifício. O coeficiente de velocidade pode ser determinado experimentalmente através da medida das coordenadas que representam a trajetória apresentada pelo jato conforme esquema proposto por Neves (1977, p. 111), ilustrado na figura 7.

Figura 7- Determinação experimental do coeficiente de velocidade.



Fonte: Neves (1977, p. 111).

Segundo Azevedo Netto (2015, p. 73), o valor médio de C_v é 0,985. Os valores que compuseram esta média encontram-se na tabela 1. Nela são apresentados os valores de coeficiente de velocidade para orifícios circulares de parede delgada.

Tabela 1 - Valores do coeficiente de velocidade para orifícios circulares de parede delgada.

Carga H (m)	Diâmetro do orifício (cm)				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,20	0,954	0,964	0,973	0,978	0,984
0,40	0,956	0,967	0,976	0,981	0,986
0,60	0,958	0,971	0,980	0,983	0,988
0,80	0,959	0,972	0,981	0,984	0,988
1,00	0,958	0,974	0,982	0,984	0,988
1,50	0,958	0,976	0,984	0,984	0,988
2,00	0,956	0,978	0,984	0,984	0,988
3,00	0,957	0,979	0,985	0,986	0,988
5,00	0,957	0,980	0,987	0,986	0,990
10,00	0,958	0,981	0,990	0,988	0,992

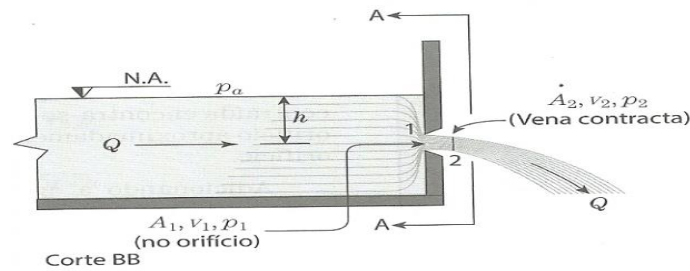
Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 75).

3.1.2.2 Coeficiente de contração

O coeficiente de contração (C_c) é definido como a relação entre a área da secção contraída (A_2) e a área do orifício (A_1), apresentadas na figura 8, de acordo com a equação 15.

$$C_c = \frac{A_2}{A_1} \quad (15)$$

Figura 8 – Representação da *vena contracta*.



Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 73).

Experimentalmente, constata-se que os filetes líquidos tocam as bordas do orifício e continuam a convergir, depois de passarem pelo mesmo, até uma seção A_2 , na qual o jato tem área sensivelmente menor que a do orifício (AZEVEDO NETTO, 2015, p. 74).

De acordo com Porto (2006, p. 352):

Na secção em que as trajetórias das partículas são sensivelmente paralelas entre si, a distribuição de velocidade é uniforme, com área transversal igual a aproximadamente 60% da área geométrica do orifício, e na qual a pressão é praticamente uniforme em todos os pontos e igual à pressão exterior da região em que a descarga está se dando.

A tabela 2 apresenta os valores do coeficiente de contração para orifícios circulares de parede delgada. O valor médio de C_c usual é da ordem de 0,62, obtido a partir dos valores apresentados abaixo.

Tabela 2 - Valores do coeficiente de contração para orifícios circulares de parede delgada.

Carga H (m)	Diâmetro do orifício (cm)				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,20	0,685	0,652	0,626	0,621	0,617
0,40	0,681	0,646	0,625	0,619	0,616
0,60	0,676	0,644	0,623	0,618	0,615
0,80	0,673	0,641	0,622	0,617	0,615
1,00	0,670	0,639	0,621	0,617	0,615
1,50	0,666	0,637	0,620	0,617	0,615
2,00	0,665	0,636	0,620	0,617	0,615
3,00	0,663	0,634	0,620	0,616	0,615
5,00	0,663	0,634	0,619	0,616	0,614
10,00	0,662	0,633	0,617	0,615	0,614

Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 75).

3.1.2.3 Coeficiente de descarga ou de vazão

O coeficiente de descarga ou de vazão (C_d) é igual ao produto dos coeficientes de velocidade e contração. Outra forma de determinar o C_d é utilizando a fórmula geral de determinação de vazão, apresentada na equação 16.

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (16)$$

Onde:

Q: Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

C_d : coeficiente de descarga do orifício;

A: Área do orifício (m^2);

g: aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

h: perda de carga imposta pelo orifício (m).

Assim, o cálculo da vazão real considera além da perda de carga, a contração da veia líquida, fenômeno que ocorre a jusante do orifício. Neves (1977, p.110) afirma que o coeficiente de vazão, como os de velocidade e contração dependem da forma e das condições do orifício, e de sua posição e situação em relação à superfície da água.

Para o orifício padrão, que é o orifício de bordas finas, afastados da superfície da água, das paredes e do fundo, os valores 0,61 ou 0,62 são utilizados como coeficiente de descarga ou vazão, sendo amplamente relatados por Neves (1977, p.110), Porto (2006, p. 352) e Azevedo Netto (2015, p. 76). A tabela 3 apresenta os valores de coeficiente de descarga para orifícios circulares, verticais de parede delgada em condições hidráulicas variadas.

Tabela 3 - Valores do coeficiente de descarga para orifícios circulares, verticais de parede delgada.

Carga H (m)	Diâmetro do orifício (cm)				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,20	0,653	0,632	0,609	0,607	0,607
0,40	0,651	0,625	0,610	0,607	0,607
0,60	0,648	0,625	0,610	0,607	0,608
0,80	0,645	0,623	0,610	0,607	0,608
1,00	0,642	0,622	0,610	0,607	0,608
1,50	0,638	0,622	0,610	0,607	0,608
2,00	0,634	0,622	0,610	0,607	0,608
3,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,608
5,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,608
10,00	0,634	0,621	0,611	0,607	0,609

De acordo com Azevedo Netto (2015, p. 86), o coeficiente de descarga C_d dependerá do comprimento relativo do tubo, isto é, de $\frac{L}{D}$. Para orifícios em paredes delgadas, $\frac{L}{D} < 0,5$. Desta forma, o autor apresenta a tabela 4 comparando valores práticos de C_d obtidos por Bazard, Eytelwein, Fanning e pelo próprio autor.

Tabela 4 - Comparação de valores práticos de coeficiente de descarga.

L/D	Azevedo Netto ⁴	Bazard	Eytelwein ⁵	Fanning ⁶
300	0,33			0,38
200	0,39			0,44
150	0,42			0,48
100	0,47	0,50		0,55
90	0,49	0,52		0,56
80	0,52	0,54		0,58
70	0,54	0,57		0,60
60	0,56	0,60	0,60	0,62
50	0,58	0,63	0,63	0,64
40	0,64	0,66	0,66	0,67
30	0,70	0,70	0,70	0,70
20	0,73	0,73	0,73	0,73
15		0,75	0,75	0,75
10		0,77	0,77	0,77

Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 87).

3.2 Tratamento de água para abastecimento humano.

Há muito tempo que os seres humanos utilizam características como cor, sabor e odor na escolha da água para o consumo. Desde então, este grau de exigência foi sendo ampliado, surgindo assim à necessidade do desenvolvimento de tecnologias que possibilitassem o tratamento de águas.

3.2.1 Tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano.

As tecnologias de tratamento de água constituem um conjunto de operações unitárias e processos químicos que combinados visam à redução ou remoção de contaminantes presentes na água *in natura*, os quais são especificados pela Portaria nº 2914 Ministério da Saúde (MS) /2011.

⁴ Valores obtidos com tubos de pequeno diâmetro

⁵ Valores obtidos com tubos de ferro fundido de DN = 0,30 m

⁶ Com tubos DN 300 mm e 30 m.c.a. de carga de entrada

A qualidade da água *in natura* (características físicas, químicas e biológicas) é determinante na escolha da tecnologia para tratamento de água para consumo humano. De acordo com Richter (2009, p. 85), outros fatores que contribuem para esta escolha são: a qualidade desejada para a água tratada, a segurança do processo, a facilidade de construção, a existência de equipamentos adequados, facilidade de operação e manutenção, e custos de construção e operação. Uma vez considerados tais fatores, é imprescindível a realização de um estudo de alternativas que contemple as condições técnicas, econômicas e financeiras, que leve em conta as tecnologias comparáveis tecnicamente (DI BERNARDO *et al.*, 2011, p. 104).

Neste sentido, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução 357 de 25 de março de 2005, classifica as águas em doces, salinas e salobras, além de agrupar seus usos preferenciais de acordo com parâmetros físico-químicos e biológicos e propor o tratamento adequado para cada classe. A tabela 5 apresenta os tratamentos necessários para cada uma das cinco classes das águas doces, de acordo com a referida resolução.

Tabela 5 - Tratamento necessário para as classes de águas doces segundo a Resolução CONAMA 357.

Classificação	Tratamento necessário
Classe especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento simplificado
Classe 2	Tratamento convencional
Classe 3	Tratamento convencional
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes

Fonte: Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução 357 de 25 de março de 2005.

Analogamente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 12.216 (1992), apresenta uma classificação para águas naturais associadas às recomendações de tecnologias de tratamento, mostradas na tabela 6.

Tabela 6 - Classificação das águas naturais para abastecimento público segundo a NBR 12.216.

Parâmetro/ Tipos de água	A⁷	B⁸	C⁹	D¹⁰
Descrição	Subterrâneas ou superficiais, bacias protegidas, atendendo ao padrão de potabilidade quanto aos demais parâmetros	Subterrâneas ou superficiais, bacias não protegidas, atendendo ao padrão de potabilidade após tratamento sem coagulação	Superficiais, bacias não protegidas, exigindo coagulação para atendimento do padrão de potabilidade	Superficiais, bacias não protegidas, sujeitas a fonte de poluição, exigindo processos especiais de tratamento
DBO₅ média (mg/L)	< 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 4,0	> 4,0
DBO₅ máxima em qualquer amostra (mg/L)	1 – 3	3 – 4	4 – 6	> 6
Coliformes totais média mensal em qualquer mês (NMP/100 mL)	50 – 100	100 - 5000	5000 - 20000	> 20000
Coliformes totais máximo (NMP/100 mL)	> 100 em menos de 5% das amostras	> 5000 em menos de 20 % das amostras	> 20000 em menos de 5% das amostras	
Cloretos (mg/L)	< 50	50-250	250-600	> 600

Continua

⁷ Tratamento tipo A: desinfecção e correção de pH.

⁸ Tratamento tipo B: desinfecção e correção de pH e (i) sedimentação simples desde que o efluente se enquadre no padrão de potabilidade ou (ii) filtração – precedida ou não de decantação - para águas afluentes à estação com turbidez inferior a 40 uT e cor aparente a 20 uC.

⁹ Tratamento tipo C: coagulação, seguida ou não de decantação, filtração rápida, desinfecção e correção de pH.

¹⁰ Tratamento tipo D: tratamento mínimo tipo C e complementar apropriado a cada caso.

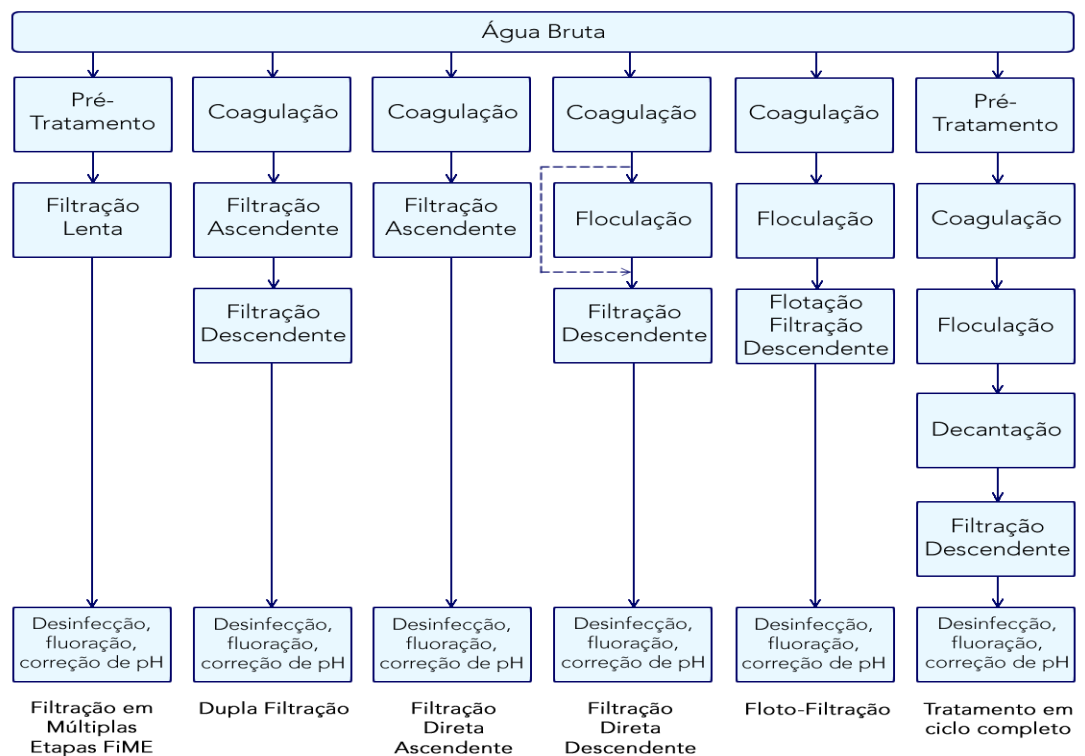
Conclusão

Parâmetro/ Tipos de água	A ¹¹	B ¹²	C ¹³	D ¹⁴
pH	5,0-9,0	5,0-9,0	5,0-9,0	3,8-10,3
Fluoretos (mg/L)	< 1,5	1,5-3,0	>3,0	

Fonte: ABNT, 1992.

As tecnologias de tratamento de água mais conhecidas encontram-se apresentadas na figura 9, disposta a seguir.

Figura 9 – Tecnologias de tratamento de água para abastecimento humano.



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005, p. 33).

¹¹ Tratamento tipo A: desinfecção e correção de pH.

¹² Tratamento tipo B: desinfecção e correção de pH e (i) sedimentação simples desde que o efluente se enquadre no padrão de potabilidade ou (ii) filtração – precedida ou não de decantação – para águas afluentes à estação com turbidez inferior a 40 uT e cor aparente a 20 uC.

¹³ Tratamento tipo C: coagulação, seguida ou não de decantação, filtração rápida, desinfecção e correção de pH.

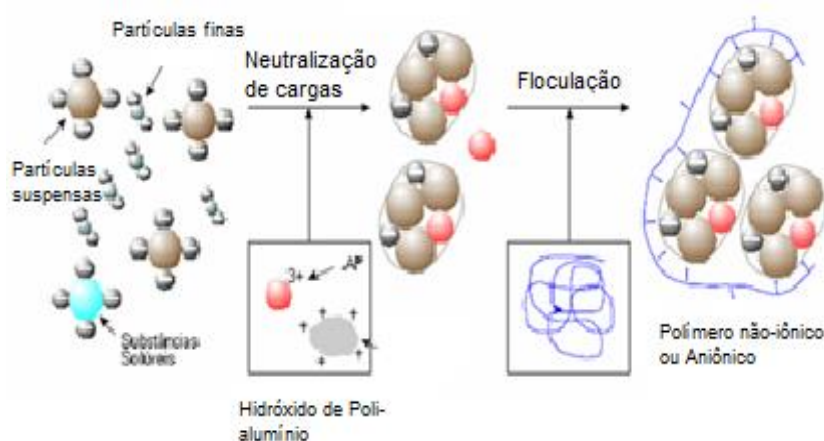
¹⁴ Tratamento tipo D: tratamento mínimo tipo C e complementar apropriado a cada caso.

O processo de potabilização da água vai ampliando sua complexidade de acordo com o decaimento da qualidade da água *in natura* do manancial, condição que favorece a utilização de tecnologias de tratamento de elevados custos tanto na implantação, quanto na operação. Tendo em vista os objetivos desta pesquisa limitaremos nossa exposição à operação de floculação.

3.3 Floculação

A floculação é uma operação unitária que promove a aglutinação entre as partículas coloidais ou suspensas, previamente coaguladas, com auxílio de uma agitação branda (mistura lenta) e gradual com gradientes de velocidade decrescentes visando à redução do número partículas disseminadas na fase líquida. Conforme ilustrado na figura 10, na floculação, as interações ocorrem entre impurezas desestabilizadas e o precipitado do metal formado ou com espécies hidrolisadas positivas e as partículas para a formação de aglomerados (DI BERNARDO e DANTAS, 2005, p. 255).

Figura 10 - Agregação de partículas e formação de flocos no processo de floculação.



Fonte: http://webensino.unicamp.br/disciplinas/ST502-293205/apoio/13/Coagula_o_e_Flocula_o.pdf.

São necessárias condições específicas para propiciar a formação e o crescimento dos flocos. Algumas variáveis físicas e químicas são determinantes para a dinâmica do processo, tais como o tempo de floculação e o gradiente de velocidade. Os parâmetros

químicos mais relevantes dependem da carga (distribuição ou densidade de cargas), peso molecular e a dosagem do polímero floculante (CARISSIMI, 2003, p.11).

A eficiência da floculação depende essencialmente de dois fatores: colisão entre as partículas, a qual é inteiramente dependente da ação física, principalmente do grau de agitação e a adesão entre as partículas, cuja intensidade é governada por forças de interação química de natureza elétrica. Como consequência, à medida que ocorre o crescimento dos flocos (em geral também acompanhado de aumento de densidade), estes se tornam cada vez mais suscetíveis à sedimentação quando a agitação for interrompida.

De acordo com Moruzzi *et al.* (2015, p. 26), os flocos formados têm estreita relação com a característica da água bruta, com os produtos químicos e com a tecnologia empregada. Assim, as características das partículas floculadas são determinantes na eficiência dos processos e na qualidade da água tratada.

A energia fornecida à massa líquida, seja hidraulicamente por meio de dispositivos de dissipação de energia, seja por equipamentos eletromecânicos, é a principal força propulsora responsável pelo transporte das partículas (MORUZZI e OLIVEIRA, 2010, p. 746). Desse modo, a influência cinética é determinante no processo de floculação, sendo o gradiente de velocidade um dos parâmetros mais importantes nos processos de agregação e ruptura de partículas.

O conhecimento de características hidrodinâmicas das unidades que compõem o sistema de clarificação é de grande importância, visto que interferem diretamente na interação entre as partículas presentes na massa líquida, e, conseqüentemente, na formação de flocos (OLIVEIRA E TEIXEIRA, 2015, p. 121).

A NBR 12.216 (ABNT, 1992), que trata sobre o projeto de estações de tratamento de água, na ausência de ensaios, recomenda gradientes de velocidade da ordem de 70 s^{-1} a 10 s^{-1} , onde o primeiro compartimento apresente o gradiente máximo enquanto o último compartimento possua o menor gradiente.

3.3.1 Mecanismos de floculação

No processo de agregação de partículas em água, três mecanismos distintos contribuem para que ocorra interação entre elas, possibilitando a formação de flocos. Tais interações são classificadas em pericinéticas¹⁵, ortocinéticas¹⁶ e sedimentação diferencial. As

¹⁵ Do grego, *peri*: ao redor ou próximo de. Relativo ao movimento Browniano (ao acaso).

interações decorrentes dos mecanismos de floculação ocorrem concomitantemente, e sua ação depende fundamentalmente do tamanho das partículas.

Para cada um destes mecanismos foram elaborados modelos baseados na premissa de que a taxa de colisão (N_{ij}) entre as partículas é proporcional ao produto das suas concentrações no meio, de acordo com a seguinte equação geral.

$$N_{ij} = \alpha_{ij} \cdot k_{ij} \cdot n_i n_j \quad (17)$$

Onde:

k_{ij} : constante de velocidade de segunda ordem que depende do mecanismo de transporte e um certo número de fatores, incluindo o tamanho de partícula;

α_{ij} : correção da taxa de floculação, normalmente chamada fator de eficiência de colisão;

n_i : número de partículas i por unidade de volume (m^{-3});

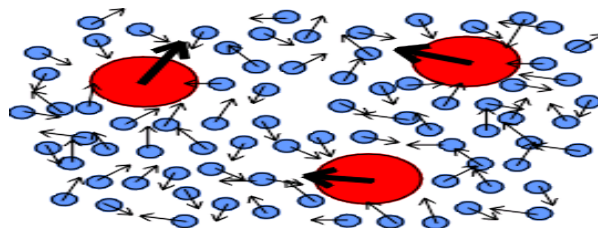
n_j : número de partículas j por unidade de volume (m^{-3}).

A seguir serão detalhados os três mecanismos de interação entre as partículas.

3.3.1.1 Floculação pericinética

Pequenas partículas suspensas em um fluido executam um movimento aleatório devido às colisões contínuas com as moléculas circundantes do solvente, tal como ilustrado na figura 11. A intensidade deste movimento é uma função da energia térmica do fluido. O processo é chamado de difusão browniana (ou movimento browniano), sendo a interação entre partículas em suspensão na água decorrente do fenômeno denominado de floculação pericinética.

Figura 11 – Movimento browniano de partículas.



Fonte: <http://www.geocities.ws/saladefisica5/leituras/browniano.html>

¹⁶ Também do grego, *ortho*: reto, exato. Relativo ao transporte hidráulico bem definido.

Segundo Bratby *et al.* (1977) *apud* Di Bernardo e Dantas (2005, p. 255), até o diâmetro de aproximadamente 1µm, as partículas são agregadas pela ação de movimento Browniano (floculação pericinética) e, a partir deste diâmetro, o crescimento dos flocos é obtido pela ação da floculação ortocinética.

Smoluchowski (1917), *apud* Di Bernardo e Dantas (2005, p. 255), propôs um modelo, apresentado na equação 18, para expressar a taxa de encontros entre partículas esféricas de tamanhos diferentes, para caso em que a difusão é responsável pelos encontros.

$$(N_{ij})_p = \frac{2.K_b.T}{3\mu} \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right) (R_i + R_j) n_i n_j \quad (18)$$

O modelo proposto por Smoluchowski possibilita expressar o número de encontros em termos dos diâmetros das partículas, conforme mostrado na equação 19.

$$(N_{ij})_p = \frac{2.K_b.T(d_i+d_j)^2}{3\mu d_i d_j} n_i n_j \quad (19)$$

Em que:

$(N_{ij})_p$: número de encontros por unidade de tempo e volume, pela difusão ($s^{-1} m^{-3}$);

K_b : constante de Boltzman ($J. ^\circ K^{-1}$);

T: temperatura absoluta ($^\circ K$);

μ : viscosidade absoluta da água ($N.s.m^{-2}$);

R_i : raio da partícula i (m);

R_j : raio da partícula j (m);

n_i : número de partículas i por unidade de volume (m^{-3});

n_j : número de partículas j por unidade de volume (m^{-3});

d_i : diâmetro da partícula i (m);

d_j : diâmetro da partícula j (m).

3.3.1.2 Floculação ortocinética

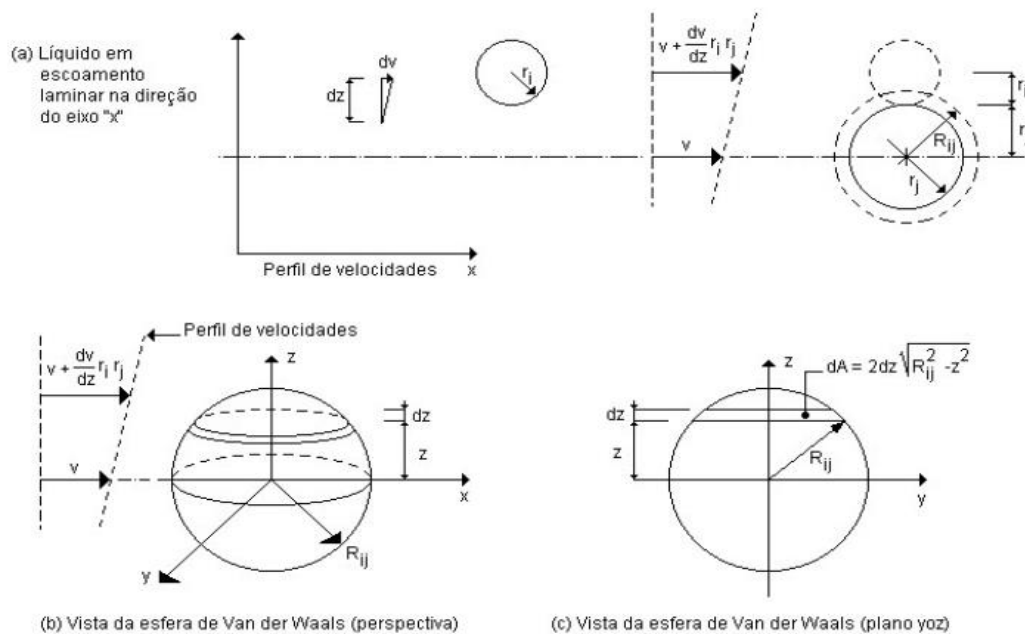
A floculação ortocinética decorre da introdução de energia externa que fomenta a aglutinação das partículas desestabilizadas e dos microflocos – formados inicialmente por intermédio do movimento Browniano -, para a formação de flocos de maior peso (LIBÂNIO,

2010, p. 211). Na floculação ortocinética, as partículas colidem devido à turbulência gerada na água por forças mecânicas exteriores. A turbulência assim gerada conduz a uma variação no espaço e no tempo da velocidade de escoamento da água (ALVES, 2010, p. 78).

O modelo matemático para este tipo de mecanismo foi também proposto por Smolowchowski, ainda na primeira década do século XX. Consiste basicamente na seguinte abordagem:

- (i) Para duas partículas n_i e n_j , com raios r_i e r_j , respectivamente, que estabelecem contato, tem-se que seus centros devem estar separados de uma distância R igual à soma de seus raios, ou seja, $R = r_i + r_j$, conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12 - Modelo matemático proposto por Smolowchowski para floculação ortocinética.



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005, p. 257).

- (ii) O número de partículas de raio r_i que se choca com as partículas de raio r_j por unidade de tempo, é igual ao número de partículas n_i por unidade de volume do líquido que escoam em regime de fluxo laminar através de uma esfera de raio R .
- (iii) Considerando o fluxo ao longo do eixo Y, o gradiente de velocidade é $\frac{dv}{dz}$ e a velocidade em um ponto a é igual a $z \cdot \frac{dv}{dz}$, sendo o elemento diferencial de área dA igual a $2 \cdot \sqrt{(R^2 - z^2)} \cdot dz$
- (iv) Pela equação da continuidade $Q = v \cdot dA$.

Assim, $dQ = z \cdot \frac{dv}{dz} \cdot [2 \cdot \sqrt{(R^2 - z^2)} \cdot (dz)]$

(v) O número de colisões (**J**) entre as partículas \mathbf{n}_i e \mathbf{n}_j é dado por:

$$J = \int n_i \cdot dQ = 2 \cdot n_i \cdot \int_0^R z \cdot \left(\frac{dv}{dz} \right) \cdot [2\sqrt{(R^2 - z^2)}] (dz)$$

(vi) Admitindo que no intervalo de integração o gradiente de velocidade seja constante, então $J = \frac{4}{3} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot R^3$

(vii) Uma vez que $R = \frac{(d_i + d_j)}{2}$ temos que $J = \frac{1}{6} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot (d_i + d_j)^3 + \frac{dv}{dz}$

A energia necessária para promover a floculação ortocinética pode ser gerada em unidades mecânicas ou hidráulicas, que serão detalhadas no item 3.3.4.

3.3.1.3 Sedimentação diferencial

Na sedimentação diferencial, partículas de diferentes tamanhos e densidade tendem a sedimentar com diferentes velocidades, com diferença de velocidade tanto maior quanto a diferença de tamanho (RICHTER, 2009, p. 134).

Para que esta interação ocorra é necessário que as partículas em suspensão se alinhem na direção vertical de forma a viabilizar as colisões, que ocorrem sob a ação da gravidade. O fenômeno é regido pela equação 20, na qual a constante k_{ij} passa a ser denominada k_d , sendo expressa pela seguinte relação:

$$K_d = \frac{\pi g(\rho - 1)}{72\nu} (d_i + d_j)^2 (d_i - d_j) \quad (20)$$

Sendo:

g: aceleração da gravidade;

ρ : massa específica das partículas;

ν : viscosidade cinemática;

d_i : diâmetro da partícula i (m);

d_j : diâmetro da partícula j (m).

A expressão é baseada nas seguintes suposições: as partículas são esféricas, têm a mesma massa específica e suas velocidades de sedimentação são previstas pela lei de Stokes.

A relação mostra ainda que a taxa de floculação por sedimentação diferencial é maximizada quando as partículas possuem tamanhos e massa específicas altas, bem como elevada diferença entre seus tamanhos. Além disso, verifica-se que os fenômenos de atração são regidos por forças de curto alcance.

Diferentemente da sedimentação discreta, durante a sedimentação de partículas floculadas são alteradas suas propriedades físicas (forma, dimensão, densidade e velocidade de sedimentação) (ALVES, 2010, p. 111). Esse tipo de sedimentação encontra-se presente nos decantadores das ETAs, promovendo aglomeração de partículas em conjunto com o processo de sedimentação.

3.3.2 Mecanismos de agregação e ruptura dos flocos

O modelo geral que integra os efeitos de agregação e quebra dos flocos elaborado por Argaman (1971) *apud* Libânio (2010, p. 217) encontra-se representado na equação 21, apresentada abaixo:

$$\frac{dN}{dt} = -(\text{função de agregação}) + (\text{função de quebra}) \quad (21)$$

Segundo o mesmo autor, a velocidade ou taxa de crescimento dos flocos, é dada pela equação 22:

$$\frac{dN_A}{dt} = -K_A N G \quad (22)$$

E a taxa de quebra, segundo Kaufman (1970) *apud* Richter (2009, p. 131) é calculada pela equação 23:

$$\frac{dN_B}{dt} = -K_B N_0 G^2 \quad (23)$$

Onde:

N_0 : concentração inicial de partículas primárias (m^{-3});

N : concentração remanescente de partículas primárias ao tempo t (m^{-3});

N_A : concentração de partículas primárias A ao tempo t (m^{-3});

N_B : concentração de partículas primárias B ao tempo t (m^{-3});

K_A : coeficiente de agregação (adimensional);

K_B : coeficiente de quebra (s);

G: gradiente de velocidade.

De acordo Parker *et al.* (1972) *apud* Di Bernardo e Dantas (2005, p. 273), duas ações básicas são consideradas responsáveis pela desagregação:

i) Erosão superficial de partículas primárias presentes nos flocos: é provocada pelo arraste da água atuando por intermédio das forças de cisalhamento na superfície dos flocos, quando se tem escoamento turbulento; ii) Fragmentação de flocos: em função das diferenças de pressões dinâmicas em lados opostos dos flocos, ocorre sua deformação e posterior fragmentação.

Ainda com respeito à ação das forças de cisalhamento, Libânio (2010, p. 216) afirma que:

As tensões de cisalhamento tendem a crescer com o tamanho dos turbilhões ou dos flocos, culminando com o tamanho máximo dos flocos, para cada condição de floculação, para a qual as forças de agregação que mantêm as partículas primárias agregadas suplantam as tensões de cisalhamento atuantes na superfície dos flocos.

3.3.3 Fatores que interferem na floculação

O conhecimento das características hidrodinâmicas das unidades que compõem o sistema de clarificação é de grande importância, visto que interferem diretamente na interação entre as partículas presentes na massa líquida, e, conseqüentemente, na formação de flocos (OLIVEIRA e TEIXEIRA, 2015, p. 121). No que tange às unidades de floculação, os parâmetros hidráulicos determinantes na eficiência são: gradiente de velocidade e o tempo de floculação. A tabela 7 apresenta os valores indicados para os parâmetros de projeto de unidades de floculação.

Tabela 7 - Principais parâmetros de projeto de unidades de floculação.

Gradiente de velocidade - G_f (s^{-1})	Tempo de Floculação – T_f (min)	Número de Camp ($G_f \times T_f$)	Fonte
10 -70	20-30 ¹⁷ 30-40 ¹⁸		ABNT (1992)
20-75 ¹⁹	15-25	40.000-75.000	AWWA (1998)

Continua

¹⁷ Floculadores hidráulicos

¹⁸ Floculadores mecanizados

¹⁹ Valores recomendados para filtração direta e tratamento convencional, respectivamente.

Conclusão

Gradiente de velocidade - G_f (s^{-1})	Tempo de Flocculação - T_f (min)	Número de Camp ($G_f \times T_f$)	Fonte
10-50 ²⁰ 10-75 ²¹	20 30		Montgomery (1985) ²²
15-60	20-60	10.000-150.000	Qasim, Motley e Zhu (2000)
10-75 ¹⁷ 25-65 ²³	1.800-2.400 ¹⁴		Richter e Azevedo Netto (1991)

Fonte: Libânio (2010, p.237).

3.3.3.1 Tempo de flocculação.

A NBR 12.216 (ABNT, 1992) estabelece que na ausência de ensaios, os tempos de flocculação devem ser de 20 a 30 minutos em unidades hidráulicas e de 30 a 40 minutos em unidades mecanizadas.

Alguns modelos podem ser utilizados para a estimativa do tempo real de detenção. Dentre estes, destacamos o modelo de Camp (1953) apud Libânio (2010, p. 223), apresentado na equação 24.

$$\frac{C}{C_o} = \frac{n^n}{(n-1)!} \left(\frac{t}{T}\right)^{n-1} e^{-nt/T} \quad (24)$$

Na qual:

n: número de câmaras em série da unidade de flocculação;

C_o , C: Respectivamente, concentração inicial do traçador e na saída da unidade após tempo t ($mg.L^{-1}$);

t: tempo real de flocculação (min);

T: Tempo teórico de detenção hidráulico da unidade de flocculação (min).

²⁰ Tratamento convencional e água bruta captada em rio.

²¹ Tratamento convencional e água bruta captada em reservatório.

²² Valores sugeridos quando o sulfato de alumínio é utilizado como coagulante, quando utilizados sais de ferro o valor de G_f não deve ser superior a $50s^{-1}$.

²³ Mais comumente utilizado

3.3.3.2 Gradiente de velocidade

Quanto ao parâmetro gradiente de velocidade, a NBR 12.216 (ABNT, 1992) recomenda que na ausência de ensaios, os valores máximos e mínimos de 70 e 10 s^{-1} , respectivamente, devem ser adotados.

De acordo com Moruzzi e Oliveira (2010 p. 751), a eficiência da floculação em sistemas contínuos depende do número de câmaras em série e dos valores do gradiente de velocidade nessas câmaras, os quais podem ser mantidos fixos ou escalonados em ordem decrescente. Quando a floculação se realiza em baixo gradiente de velocidade e longo tempo de detenção, os flocos formados tenderão a apresentar maiores dimensões, menor densidade – com alta porcentagem de água incorporada à estrutura do floco - e menor resistência ao cisalhamento (LIBÂNIO, 2010, p. 226).

As unidades mecanizadas ou hidráulicas possuem, respectivamente, câmaras ou canais em série, para que o gradiente de velocidade diminua do início até o fim, à medida que o tempo de floculação aumenta, além de reduzir os curtos-circuitos hidráulicos (DI BERNARDO E SABOGAL PAZ, 2008, p. 159). Estas ações são realizadas para evitar a ruptura dos flocos formados ao longo das câmaras, além de favorecer a agregação das partículas remanescentes, promovendo assim uma floculação com maior eficiência.

3.3.3.3 Compartimentação da unidade de floculação.

A experiência tem demonstrado que é bastante vantajoso realizar a floculação em etapas, ao longo das quais o gradiente de velocidade vai diminuindo gradualmente. Esse efeito contribui tanto para continuidade da ação agregadora entre os flocos como principalmente para a estabilidade dos mesmos, uma vez que flocos maiores são mais susceptíveis à ruptura. Para a consecução deste propósito, os floculadores são normalmente subdivididos em câmaras que operam em série, nas quais, em geral, procura-se compensar a redução do gradiente de velocidade aumentando-se o tempo de floculação, de modo que o produto $G \cdot t_f$ (conhecido como número de Camp) seja mais ou menos constante.

De acordo com Vianna (2002, p. 227), o aumento da eficiência das unidades de floculação hidráulicas pode ser demonstrado com base no modelo de Smoluchowski, conforme desenvolvimento a seguir:

(i) Decorrida a fração de tempo dt , a variação da concentração de partículas suspensas \mathbf{dn} será função do número de choques \mathbf{J}_{ij} , previstos pela equação de Smoluchowski.

Assim, temos que $\frac{dn}{dt} \propto \mathbf{J}_{ij}$ ou $\mathbf{dn} = -\mathbf{k} \mathbf{J}_{ij} dt$.

(ii) Aplicando a equação de Smoluchowski ($\mathbf{J}_{ij} = \frac{1}{6} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3 \mathbf{G}$) temos:

$$\mathbf{dn} = -\mathbf{k} \left[\frac{1}{6} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3 \cdot \mathbf{G} \right] dt.$$

(iii) Integrando, obtêm-se $\int_{n_0}^{n_t} \mathbf{dn} - \mathbf{k} \left[\frac{1}{6} \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3 \mathbf{G} \right] \int_0^t dt$, cujo resultado é:

$$n_0 - n_t = \frac{\mathbf{k}}{6} [\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3 \mathbf{G}] t \quad \text{ou} \quad \frac{n_0}{n_t} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{k}}{6} \cdot \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3}{n_t} \mathbf{G} t$$

(iv) O termo $\frac{\mathbf{k}}{6} \cdot \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j (\mathbf{d}_i + \mathbf{d}_j)^3}{n_t}$ está relacionado com a concentração das partículas no meio, bem como com a capacidade de aglutinação pelos choques, sendo, para efeito de simplificação substituído pelas constantes η e φ , de forma que $\frac{n_0}{n_t} = \mathbf{1} + \eta \varphi \mathbf{G} t$

(v) Para um floculador com \mathbf{m} câmaras em série, cada uma delas com tempo de detenção igual a t/m , temos que o número de partículas remanescentes após a primeira câmara é $\frac{n_0}{n_1} = \mathbf{1} + \eta \varphi \mathbf{G} \frac{t}{m}$; após a segunda câmara $\frac{n_1}{n_2} = \mathbf{1} + \eta \varphi \mathbf{G} \frac{t}{m}$ e assim sucessivamente até a m -ésima câmara onde $\frac{n_{m-1}}{n_m} = \mathbf{1} + \eta \varphi \mathbf{G} \frac{t}{m}$

(vi) Desta forma é possível estabelecer que $\frac{n_0}{n_m} = (\mathbf{1} + \eta \varphi \mathbf{G} \frac{t}{m})^m$, o que significa que a compartimentação favorece o aumento da eficiência da floculação.

3.3.4 Tipos de unidades de floculação.

Tendo em vista, que a floculação ortocinética é a mais eficiente entre os mecanismos de interações e agregação entre as partículas, faz-se necessário a introdução de energia, que pode ser de origem hidráulica ou mecânica. Com isso, as unidades de floculação se subdividem de acordo com a forma de transferência de energia para a massa do líquido.

A escolha do tipo de sistema de floculação está condicionada a diversos fatores, tais como: qualidade da água bruta, mecanismo de coagulação, tamanho das unidades,

existência de pessoal qualificado, regime de funcionamento (vazão constante ou variável, contínuo ou intermitente), etc (DI BERNARDO E SABOGAL PAZ, 2008, p. 156).

3.3.4.1 Unidades mecânicas

Os flocculadores mecânicos são divididos em grupos de acordo com o tipo de movimento que executam. Os do tipo paletas ou turbinas, mais comuns, apresentam movimento giratório. Também se pode encontrar flocculadores de movimento oscilantes. As unidades de flocculação mecanizadas distinguem-se basicamente pelo eixo, vertical ou horizontal, por meio do qual as paletas, turbinas ou hélices estão conectadas aos conjuntos de motor-redutor (LIBÂNIO, 2010, p. 246).

De acordo com a NBR 12.216, (ABNT, 1992), os tanques de flocculação mecanizados devem ser subdivididos preferencialmente em pelo menos três compartimentos em série, separados por cortinas ou paredes, interligados. Outra recomendação apresentada na norma é de que a potência fornecida à água por agitadores mecânicos deve ser determinada pela equação 25.

$$P = \mu \cdot G^2 \cdot V \quad (25)$$

Onde:

P: Potência (W);

μ : Viscosidade dinâmica (Pa.s);

G: Gradiente de velocidade (s^{-1});

V: Volume útil do compartimento (m^3).

Entre as vantagens apresentadas quanto à utilização de flocculadores mecanizados, Libânio (2010, p. 256) lista as dispostas a seguir:

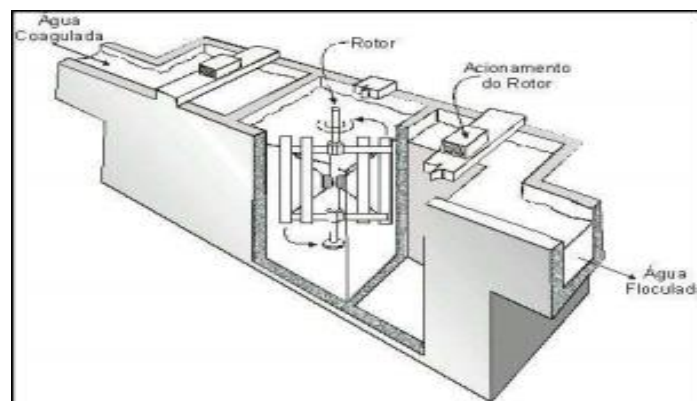
- I) Perda de carga praticamente nula como consequência do menor número de câmaras;
- II) Maior facilidade de instalação em estações existentes, principalmente as unidades de eixo vertical cujos conjuntos motor-redutor são mais facilmente instalados nas passarelas sobre as câmaras de flocculação;
- III) Facilidade de adaptação na perspectiva de automação do processo de tratamento; e

- IV) Maior flexibilidade de operação em função das variações das características da água bruta.

3.3.4.1.1 Floculadores de paletas.

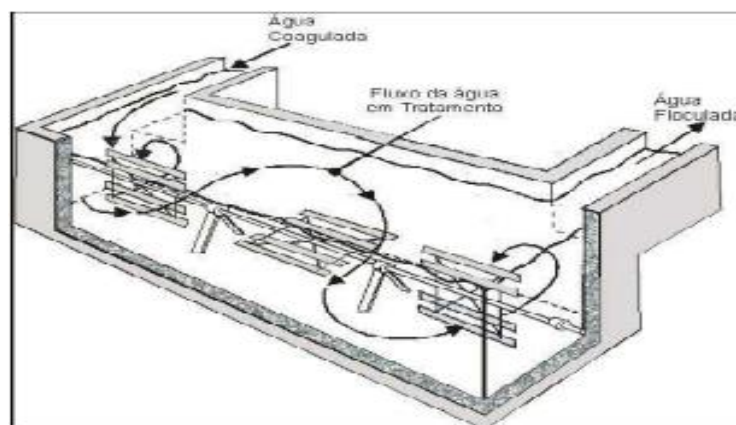
No geral, os floculadores mecanizados do tipo paletas podem ser de três tipos: floculadores de paleta única, de eixo vertical; floculadores de paletas de eixo vertical (figura 13); e floculadores de paletas de eixo horizontal (figura 14).

Figura 13 – Floculador mecanizado do tipo paletas de eixo vertical.



Fonte: Vianna (2002, p. 237).

Figura 14 – Floculador mecanizado do tipo paletas de eixo horizontal.



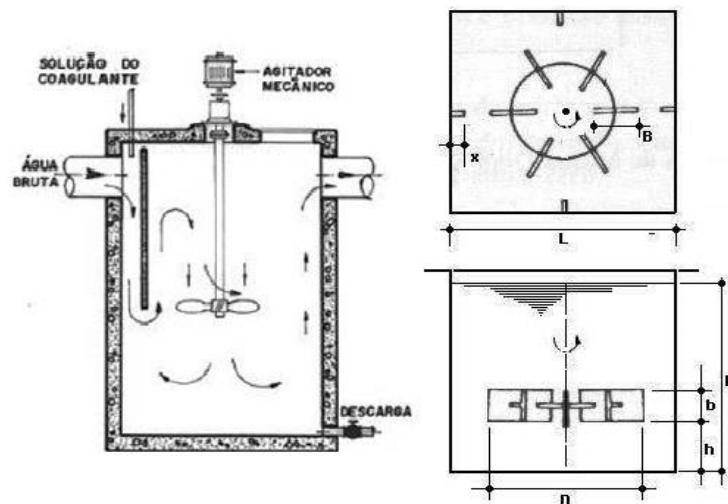
Fonte: Vianna (2002, p. 239).

De acordo com Vianna (2002, p. 238), o gradiente de velocidade depende da velocidade de rotação do eixo e das características da paleta: altura, espessura e espaçamento.

3.3.4.1.2 Floculadores de turbina.

Floculadores do tipo turbina, ilustrados na figura 15, em geral são utilizados para unidades que operam em altas velocidades. Neste tipo de floculadores, o gradiente de velocidade depende de fatores como as características da turbina (diâmetro, tipo, etc) e o eixo da rotação VIANNA (2002, p. 249).

Figura 15 – Floculador do tipo turbina.



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgxr0AA/tratamento-agua-consumo-humano-t-a-1-1>

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2008, p. 178), os agitadores do tipo turbina são recomendados para gradientes de velocidade médios superiores a 30 s^{-1} , em virtude da alta velocidade periférica da paleta para promover mistura completa.

3.3.4.2 Unidades hidráulicas.

Qualquer dispositivo que utilize a energia hidráulica dissipada no fluxo da água através de um tanque, canal, canalizações pode constituir um floculador hidráulico (RICHTER, 2009, p. 139). Muitos são os tipos de floculadores hidráulicos: chicanados, Alabama, Cox, helicoidais, manto de lodo, floculadores de pedregulhos, entre outros. Entre estes, o mais utilizado no Brasil é o floculador de chicanas com fluxo horizontal ou vertical.

Quanto às vantagens e desvantagens dos flocladores hidráulicos de acordo com Di Bernardo e Sabogal Paz (2008, p. 156):

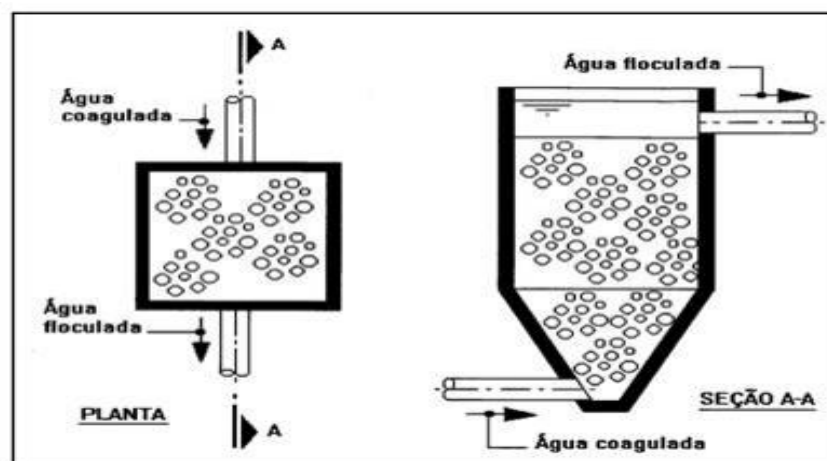
Os sistemas hidráulicos de floclação, quando comparados com os mecanizados, apresentam alguns inconvenientes, tais como: pouca flexibilidade em relação à variação de vazão, impossibilidade de variar ou ajustar o gradiente de velocidade e perda de carga relativamente alta. Entretanto, os hidráulicos apresentam algumas vantagens, destacando-se: baixo requerimento de pessoal qualificado e menores gastos com implantação, operação e manutenção.

Segundo Richter (2009, p. 140), a eficiência dos flocladores hidráulicos pode ser superior à de outros flocladores. Tendo em vista que, os tanques de floclação mecânica estão sujeitos a curtos-circuitos e zonas mortas, praticamente inexistentes na floclação hidráulica.

3.3.4.2.1 Floclador em meio poroso ou granular.

Na floclação em meio poroso, a água após receber o coagulante na unidade de mistura rápida passa por um tanque contendo leito granular. De acordo com Richter (2009, p. 147), em flocladores de pedras é suficiente um tempo de floclação de 3 a 5 minutos, porém, o parâmetro determinante é o número de Camp, que não deve ser inferior a $1,5 \times 10^4$. A figura 16 mostra um floclador em meio poroso.

Figura 16 - Floclador em meio poroso ou granular.



Fonte: VIANNA (2002, p. 273).

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2008, p. 159), a principal vantagem da floclação em meio granular (fixo ou expandido) é a redução do tempo médio de detenção da

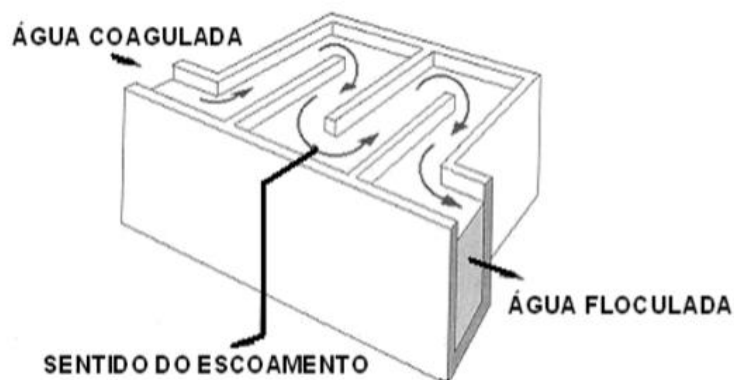
água, que pode chegar a ser de 2 a 10 min. No entanto, a qualidade da água bruta, a limpeza do meio granular fixo e a capacidade da estação podem restringir o uso desse tipo de unidade.

3.3.4.2.2 Floculadores de chicanas.

Nos floculadores de chicanas a energia necessária para o processo de floculação é obtida a partir das sucessivas mudanças de direção dos canais que compõem o floculador. A disposição e o espaçamento entre as chicanas são fatores que conferem o gradiente de velocidade para a promoção dos choques e formação dos flocos (LIBÂNIO, 2010, p. 243).

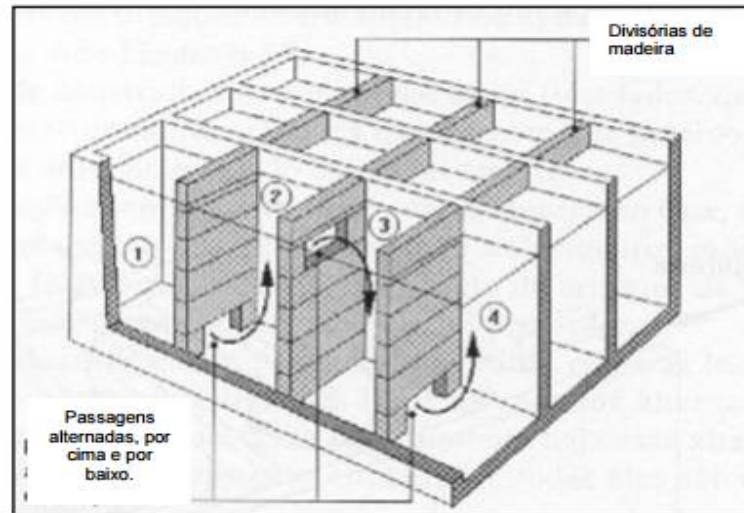
Os floculadores de chicanas podem ser compostos por chicanas horizontais ou verticais. Nas de fluxo horizontal, ilustrada na figura 17, a água percorre as chicanas em movimentos de vai e vem. Nas chicanas verticais, apresentada na figura 18, ocorrem movimentos de sobe e desce enquanto a água contorna os compartimentos delimitados pelas chicanas. Segundo Richter (2009, p. 140), a escolha do tipo de floculador de chicanas, se de fluxo horizontal ou vertical, depende mais de razões de ordem prática e econômica.

Figura 17 - Floculador hidráulico do tipo chicanas horizontais.



Fonte: VIANNA (2002, p. 254).

Figura 18 - Floculador hidráulico do tipo chicanas verticais.



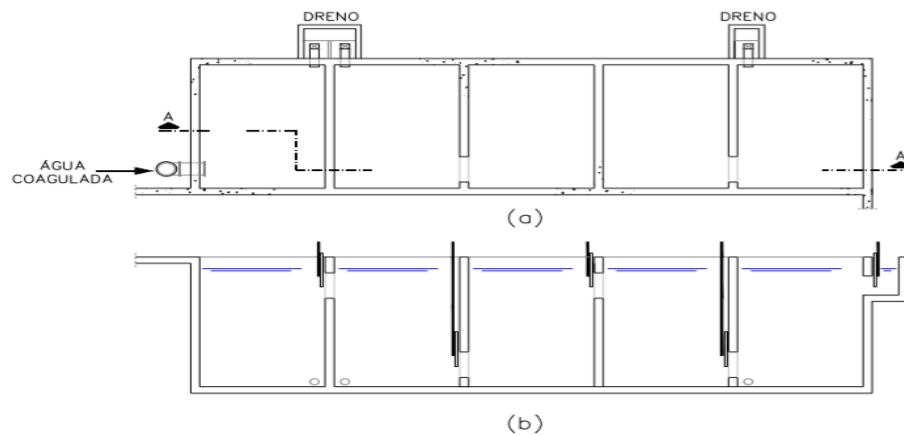
Fonte: VIANNA (2002, p. 253).

Muitas são as vantagens observadas na utilização de floculadores do tipo chicanas, entre elas, o baixo custo de operação e manutenção, apresenta baixa presença de zonas mortas e de curto-circuito, entre outras. Quanto às desvantagens da utilização deste tipo de floculador, pode-se citar a grande quantidade de compartimentos, fator que aumenta a área dos floculadores e dificulta a limpeza. Além disso, quando realizado um dimensionamento inadequado dessas unidades podem ocorrer ruptura dos flocos na passagem pelas voltas.

3.3.4.2.3 Floculador do tipo Cox.

O floculador foi idealizado pelo engenheiro Charles R. Cox, quando consultor do Ministério da Saúde do Brasil, na década de 1960 (RICHTER, 2009, p.144). A figura 19 ilustra o floculador hidráulico do tipo Cox, apresentando uma planta baixa e um corte da seção longitudinal do mesmo.

Figura 19 - Floculador hidráulico do tipo Cox, (a) planta baixa (b) seção longitudinal- AA



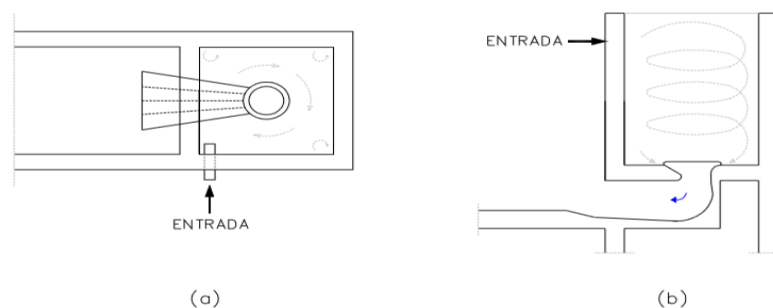
Fonte: LIBÂNIO (2010, p. 245).

Esse tipo de floculador tem pequeno número de câmaras (normalmente em torno de oito), e as interligações entre as câmaras alternam posições superiores e inferiores. Embora haja essa alternância, no que diz respeito ao posicionamento altimétrico, todas elas são construídas alinhadas em planta (VIANNA, 2002, p. 255).

3.3.4.2.4 Floculadores de escoamento helicoidal.

Nos floculadores helicoidais (também chamados de fluxo tangencial ou de fluxo espiral), a energia é usada para gerar um movimento helicoidal à água introduzida por uma entrada tangencial na câmara de floculação (RICHTER, 2009, p.144). A figura 20 ilustra um floculador de fluxo helicoidal em planta e corte transversal.

Figura 20 - Floculador de fluxo helicoidal, (a) Planta baixa (b) Secção transversal

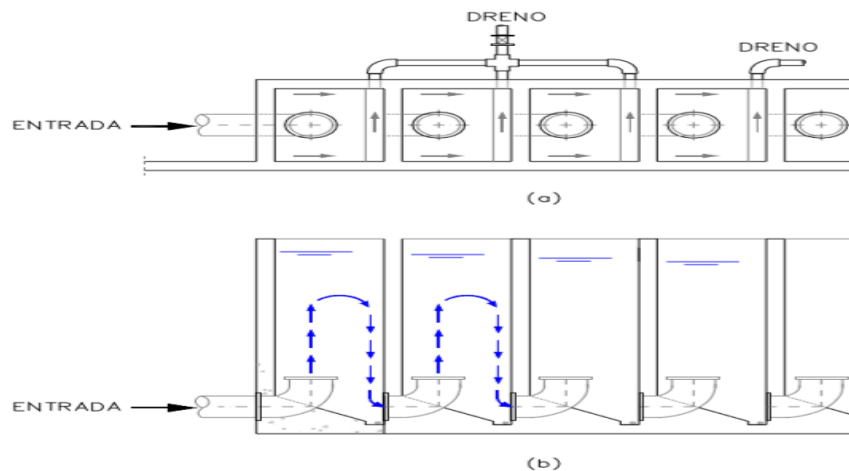


Fonte: RICHTER (2009, p.144).

3.3.4.2.5 Floculadores tipo Alabama.

Neste tipo de floculador, apresentado na figura 21, o fluxo é ascendente e descendente no interior do mesmo compartimento e, assim, tira-se proveito do fenômeno de floculação por sedimentação diferencial, associada à floculação ortocinética, o que faz esse tipo de floculador muito mais eficiente, apesar da sua simplicidade (RICHTER, 2009, p.144).

Figura 21 - Floculador Alabama, (a) Planta baixa (b) Secção longitudinal.



Fonte: LIBÂNIO (2010, p. 240).

Nas unidades hidráulicas de escoamento helicoidal, comumente dispõem-se, em lados alternados, aberturas inferiores dotadas de anteparos ou curvas de 90° para impingir o escoamento sempre na direção ascendente (LIBÂNIO, 2010, p. 240).

Segundo Vianna (2002, p. 257), no interior das câmaras dos floculadores do tipo Alabama não há a necessidade de se manter a velocidade média de escoamento superior a $0,10 \text{ m.s}^{-1}$, isto porque não há interesse de em se arrastar os flocos para cima.

A Tabela 8 apresenta as principais vantagens e desvantagens de floculadores do tipo Alabama.

Tabela 8 - Principais vantagens e desvantagens de flocladores do tipo Alabama.

Vantagens	Desvantagens
Os gastos com investimentos, operação e manutenção são baixos;	O desempenho das unidades não é confiável devido à presença de zonas mortas e curtos-circuitos hidráulicos;
	O lodo pode acumular-se no fundo das unidades, gerando problemas na limpeza;
O floclador do tipo Alabama é recomendado para ETAs com vazões de até 100 L/s.	As unidades não possuem teoria específica para projeto, sendo implantados conforme experiências passadas;
	A variação de vazão ou da qualidade da água bruta pode comprometer o desempenho da unidade, pois não há como ajustar o gradiente de velocidade.

Fonte: DI BERNARDO E SABOGAL PAZ (2008, p. 174).

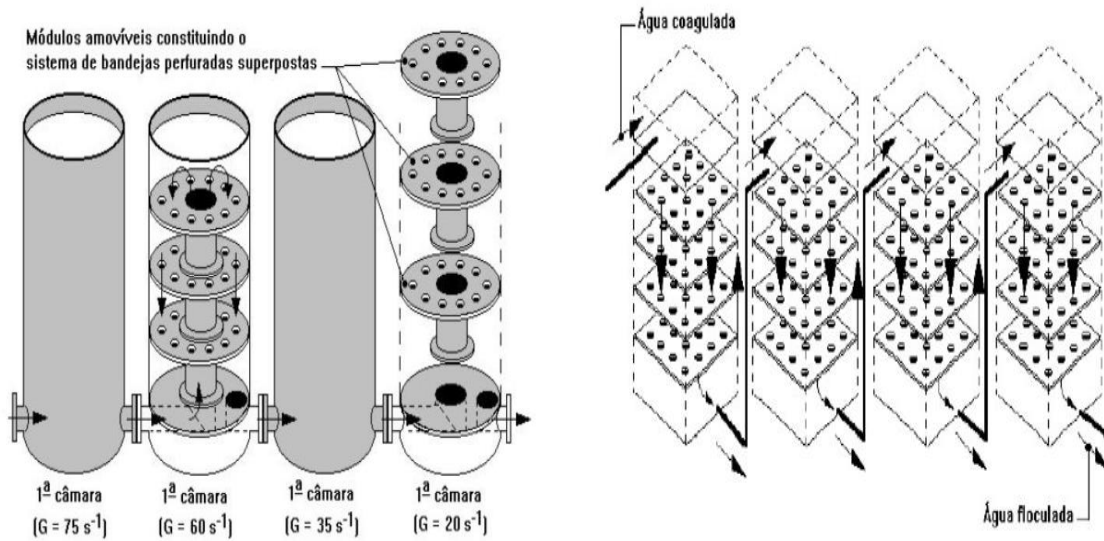
3.3.4.2.6 Floclador de bandejas perfuradas

Este tipo de floclador foi concebido pelo engenheiro Marcos Rocha Vianna²⁴ no final da década de 1970, especialmente para ser utilizado em estações de tratamento de água pré-fabricadas (VIANNA, 2002, p. 263).

O floclador de bandejas perfuradas funciona com unidades em série, seja em forma cilíndrica ou de paralelepípedo. Cada unidade é composta por bandejas perfuradas. De acordo com Vianna *et al.* (2015, p. 5), o diâmetro dos orifícios nas placas são menores no primeiro cilindro, maiores no segundo, torna-se maior no terceiro e ainda maior no quarto. Deste modo, a intensidade da turbulência diminui de montante para jusante, enquanto o processo de floclação ocorre. A figura 22 apresenta o floclador do tipo bandejas perfuradas em sua concepção original e atual.

²⁴ Professor adjunto da Universidade Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC).

Figura 22 - Floculador hidráulico do tipo bandejas perfuradas.



Fonte: VIANNA (2002, p. 264-265).

I) Concepção original

II) Concepção atual

Nos floculadores de bandejas, o líquido é introduzido no topo da câmara, promovendo um fluxo descendente. Após a agitação que ocorre pela passagem do líquido através dos orifícios presentes nas bandejas, o líquido é conduzido à câmara seguinte por meio de um conduto. Cada câmara trabalha com gradiente de velocidade decrescente, a fim de promover a floculação e evitar a ruptura dos flocos anteriormente formados.

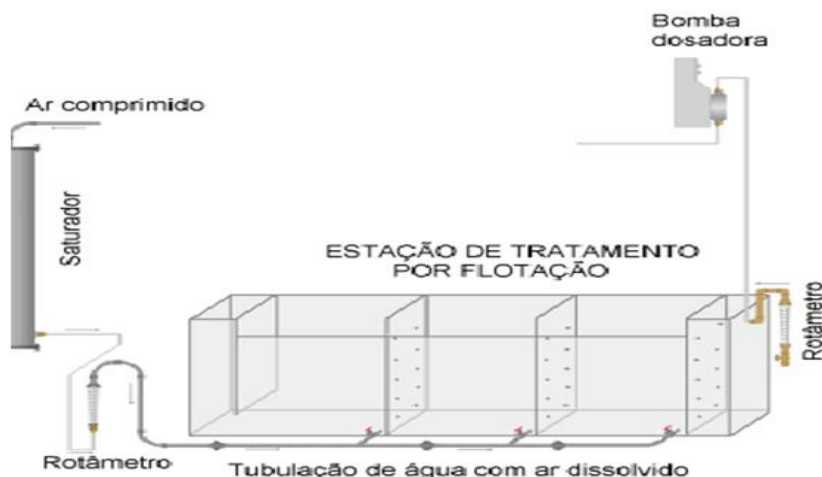
3.4 Floco-flotador por ar dissolvido

O FFAD constitui um equipamento que integra as operações de floculação e flotação. É composto por um floculador de placas verticais (contendo orifícios) que subdividem o equipamento em câmaras nas quais ocorrem simultaneamente os processos de floculação e flotação.

O protótipo do FFAD, ilustrado na figura 23, é todo construído em acrílico transparente e foi desenvolvido em parceria da Universidade Federal do Ceará (UFC) com a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). O equipamento é subdividido em cinco compartimentos, sendo o primeiro utilizado para a introdução da água afluyente. Os três compartimentos intermediárias denominadas de câmaras de floco-flotação são divididas por placas dispostas paralelamente, contendo 10 orifícios de diâmetros 8, 10 e 15 mm

respectivamente. No último compartimento é realizada a coleta da água efluente após o tratamento.

Figura 23 - Equipamento floco-flotador por ar dissolvido.



Fonte: Chaves (2012, p. 58).

Cada câmara possui uma placa contendo orifícios com diâmetros maiores que os orifícios que compõem a câmara anterior, propiciando a redução do gradiente de velocidade ao longo das câmaras, visando a não ruptura dos flocos formados, conforme recomendado pela NBR 12.216.

O FFAD é alimentado com água coagulada, que ao passar pelos orifícios de cada câmara tem a energia potencial - carga - transformada em energia cinética, possibilitando os choques entre as partículas desestabilizadas e a formação de flocos. Simultaneamente, parte do efluente tratado (em torno de 10%) é recirculado passando por uma câmara de saturação onde ocorre a dissolução de ar a uma pressão da ordem de 506,63 kPa (5 atm). Ao retornar ao equipamento, o ar dissolvido uma vez exposto à pressão atmosférica, evolui ao longo da coluna d'água liberando microbolhas que aderem aos flocos, emergindo e realizando a separação sólido-líquido.

A câmara de saturação é constituída basicamente por um cilindro de PVC, reforçado com fibra de vidro, que recebe água e ar sob pressão através de um conjunto motor-bomba e de um compressor, respectivamente, sendo responsável por saturar água tratada com ar atmosférico (CHAVES, 2012, p. 64). O sistema de recirculação da água saturada com ar dissolvido é composto por três válvulas do tipo agulha, responsáveis pela introdução da água saturada nas câmaras de flotação.

Em estudo realizado por Chaves (2012, p. 79) utilizando um FFAD para tratamento de água de lavagem dos filtros (ALF) oriunda de uma ETA de filtração direta, foram obtidas elevadas eficiências na remoção de sólidos suspensos (87,1%), coliformes totais (98,2%), turbidez (99,2%), DBO (92,5%), cor (98,1%) e alumínio (88,5%). A figura 24 apresenta o FFAD durante o tratamento de ALF.

Figura 24 – FFAD atuando no tratamento de ALF.



Fonte: CHAVES (2012, p. 79).

Estudos realizados por Oliveira (2013, p. 73-75), utilizando o FFAD para remoção de fitoplâncton em efluentes de lagoas de estabilização apresentou excelentes resultados conforme apresentados na tabela 9 e figura 25.

Figura 25 – FFAD atuando no tratamento de efluentes oriundos de lagoa de estabilização.



Fonte: OLIVEIRA (2013, p. 73).

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para a avaliação de eficiência do FFAD e percentual de remoção.

	Efluente	Clarificado	% de remoção
Turbidez (NTU)	129	4,03	97
DQO (mg/L)	186	36,7	80
DBO (mg/L)	78,6	20,7	73
Sólidos Suspensos (mg/L)	84	5,4	93
Coliformes Totais (NMP)	$3,9 \times 10^6$	$3,8 \times 10^5$	90
C. Termo tolerantes (NMP)	$4,8 \times 10^3$	$5,4 \times 10^2$	98,8
Densidade de organismos (ind/mL)	54277,60	591,9	98

Fonte: OLIVEIRA (2013, p. 75).

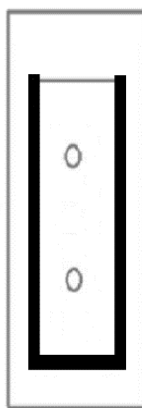
4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado no Centro de Pesquisa em Águas da CAGECE, localizado nas instalações da ETA Gavião, no município de Pacatuba-CE, no período de julho de 2014 a agosto de 2015. A fase experimental consistiu na realização de diversos ensaios, descritos ao longo da metodologia, utilizando o equipamento FFAD, em escala piloto.

A modelagem matemática desenvolvida após os experimentos foi fundamentada em estudos preliminares apresentados por Camp (1961, p. 244), o qual contribuiu para o desenvolvimento de flocladores de bandeja elaborado por Vianna (2002, p.339), e no método utilizado por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) para dimensionamento de cortinas de distribuição de água em decantadores.

Ao realizar os primeiros testes, foi diagnosticada a necessidade de algumas alterações estruturais no equipamento piloto, apresentado na figura 23. Dentre as alterações realizadas, pode-se listar a retirada das duas primeiras placas do equipamento original. No local da primeira placa foi inserido um suporte (em forma de gaveta) que possibilitou a troca das placas que foram usadas no presente estudo com diferentes diâmetros de orifícios, conforme ilustrado na figura 26.

Figura 26 - Detalhe do suporte para placas

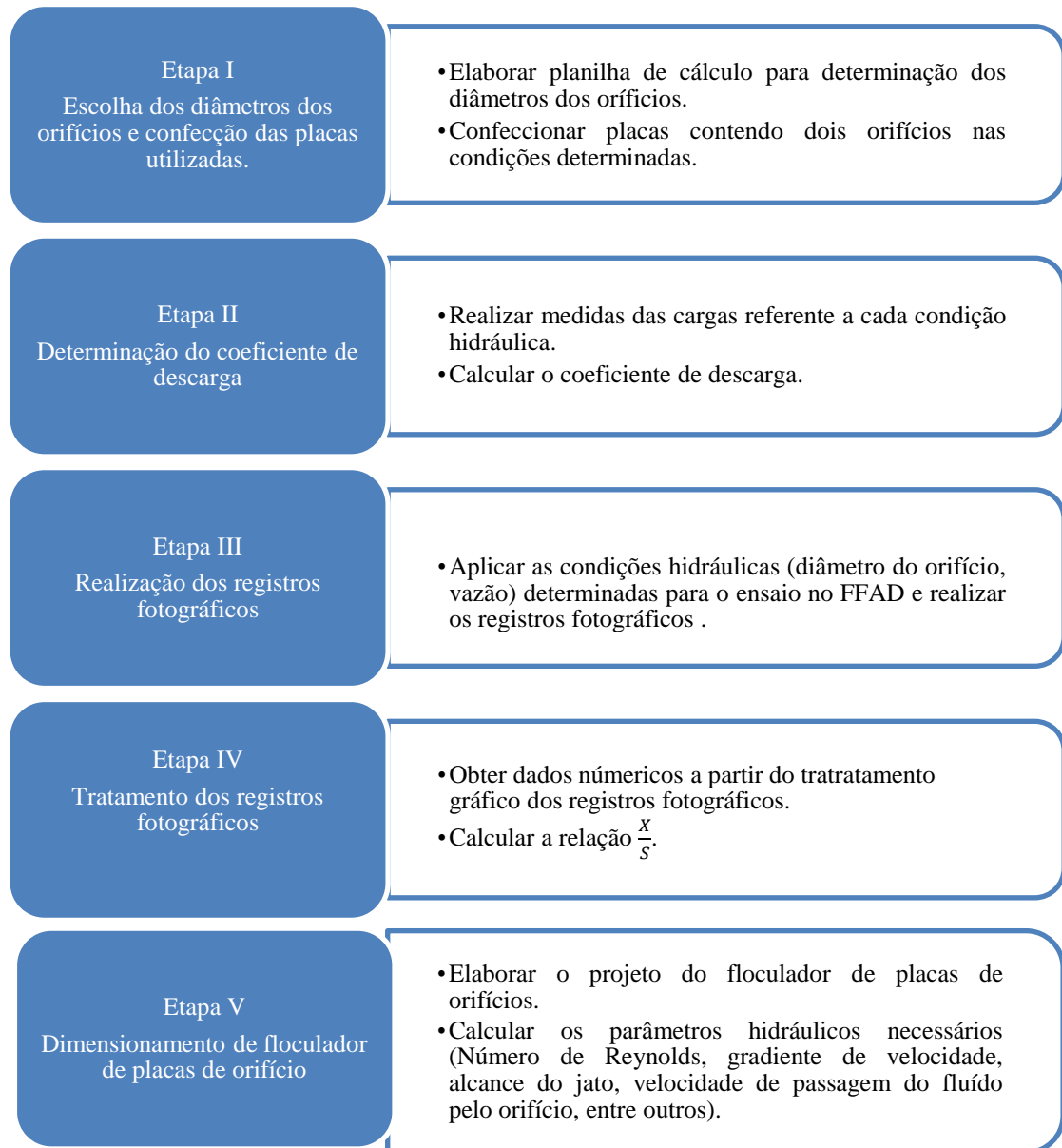


Fonte: O autor.

Após as referidas alterações estruturais, o FFAD passou a possuir duas câmaras, uma vez que as duas primeiras câmaras originais se tornaram uma só com volume ampliado para evitar interferências no comportamento dos cones formados a partir da passagem de

corante pelos orifícios. Após esta intervenção, deu-se início a pesquisa propriamente dita, a qual foi realizada em etapas, descrita no esquema apresentado na figura 27.

Figura 27 - Esquema das atividades realizadas ao longo da pesquisa.



Fonte: O autor.

4.1 Etapa I - Escolha dos diâmetros dos orifícios e confecção das placas utilizadas.

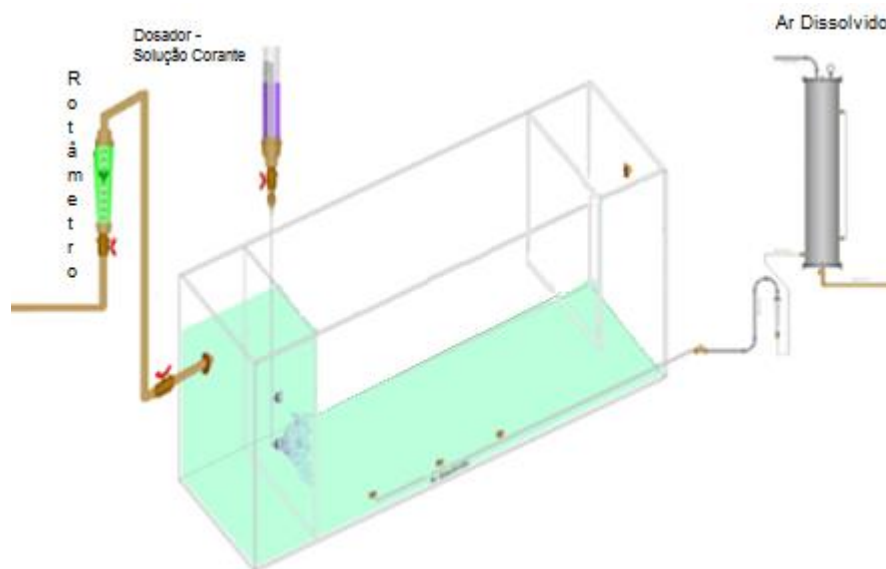
Para realizar a confecção das novas placas do equipamento, foi necessária a determinação dos diâmetros dos orifícios. Para tanto, foi elaborada uma planilha de cálculo no programa Excel[®], utilizando-se a mesma formulação matemática empregada na construção do equipamento. De acordo com Chaves (2012, p. 60), a formulação matemática requerida para o dimensionamento das placas perfuradas foi utilizada a partir da metodologia já estabelecida para o projeto de cortinas de distribuição de água floculada aplicada aos decantadores, conforme descrito por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) apresentado no tópico 3.1.1.

Após os cálculos, foram confeccionadas cinco placas em acrílico transparente com dimensões iguais a 400, 100 e 3 mm (altura, largura e espessura, respectivamente), de forma a possibilitar o encaixe na base instalada. Em cada placa foram abertos dois orifícios, distanciados entre si em 250 mm, com os diâmetros de: 9,4, 12,2, 16, 17,5, 19 mm, escolhidos de acordo com a disponibilidade comercial das brocas. Os respectivos diâmetros possibilitaram a obtenção de gradientes entre 2,50 e 39 s⁻¹ e a velocidade entre 0,2 e 1,9 m.s⁻¹.

4.2 Etapa II - Determinação do coeficiente de descarga.

Para determinação do coeficiente de descarga (C_d) foram realizadas as medidas das cargas efetivas a montante do orifício, tendo como referência (zero) o centro do orifício. As leituras das alturas das cargas foram realizadas utilizando um paquímetro (marca: Mitutoyo) utilizando o aparato instrumental ilustrado na figura 28.

Figura 28 - Aparato instrumental para a determinação da perda de carga.



Fonte: O autor.

Foram estudadas variadas combinações de área dos orifícios e vazão que geraram vinte condições hidráulicas, para as quais foram efetuadas medidas em triplicata da carga. Posteriormente, estes dados foram utilizados para o cálculo do coeficiente de descarga nos orifícios superior (leituras Cd_{1-3}) e inferior (leituras Cd_{4-6}), utilizando a equação 8.

Visando realizar também a medida da perda de carga proveniente de cada orifício individualmente nos diversos diâmetros e vazões, um dos orifícios foi vedado. Em seguida, foram aplicadas as vazões estipuladas, sendo as leituras de carga realizadas após a estabilização do nível da água no tempo determinado em estudo prévio.

Convém salientar que o experimento que possibilitou a determinação do C_d foi executado com orifícios de parede delgada, não afogados, divergindo da condição real de funcionamento do floculador, na qual os mesmos encontram-se submersos. Tal divergência foi ocasionada por uma limitação do equipamento. O volume da primeira câmara era insuficiente para permitir a medição da coluna d'água referente à carga da vazão aplicada na alimentação. Entretanto, a modificação mencionada não deve afetar os resultados de modo significativo, pois, Porto (2006), afirma que os valores de coeficiente de vazão em descarga livre são praticamente os mesmos dos orifícios com descarga afogada.

Na fase de determinação do coeficiente de descarga, observaram-se dificuldades na estabilização do sistema para realização da medida, entre elas: a variação da vazão nominal no rotâmetro de alimentação do FFAD e oscilações na coluna d'água a montante da placa com

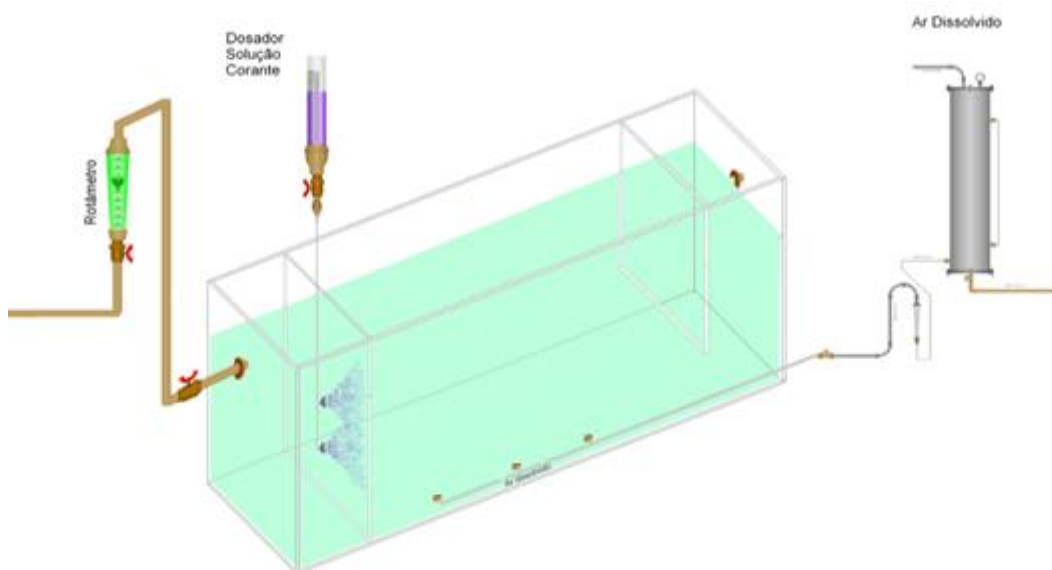
orifícios. No intuito de minimizar os erros nas leituras das cargas, foi realizado um estudo prévio para determinação do intervalo de tempo necessário para a estabilização do fluxo e da coluna d'água após cada alteração de vazão. As leituras das alturas foram realizadas utilizando a placa com orifícios de 9,4 mm de diâmetro, vazão de 500 L.h^{-1} e um paquímetro em intervalos de 5 minutos entre cada leitura.

Após o cálculo dos coeficientes de descarga, os dados obtidos foram submetidos ao teste estatístico *Z score* para diagnosticar a presença de *outliers*. Posteriormente, foi realizado o cálculo da média populacional e do seu limite de confiança.

4.3 Etapa III - Registro do comportamento e alcance dos jatos.

Na fase de registro dos jatos foi realizada a inserção da solução de permanganato de potássio 0,01 M, mediante o sistema, apresentado na figura 29.

Figura 29 - Sistema de inserção de corante no FFAD.



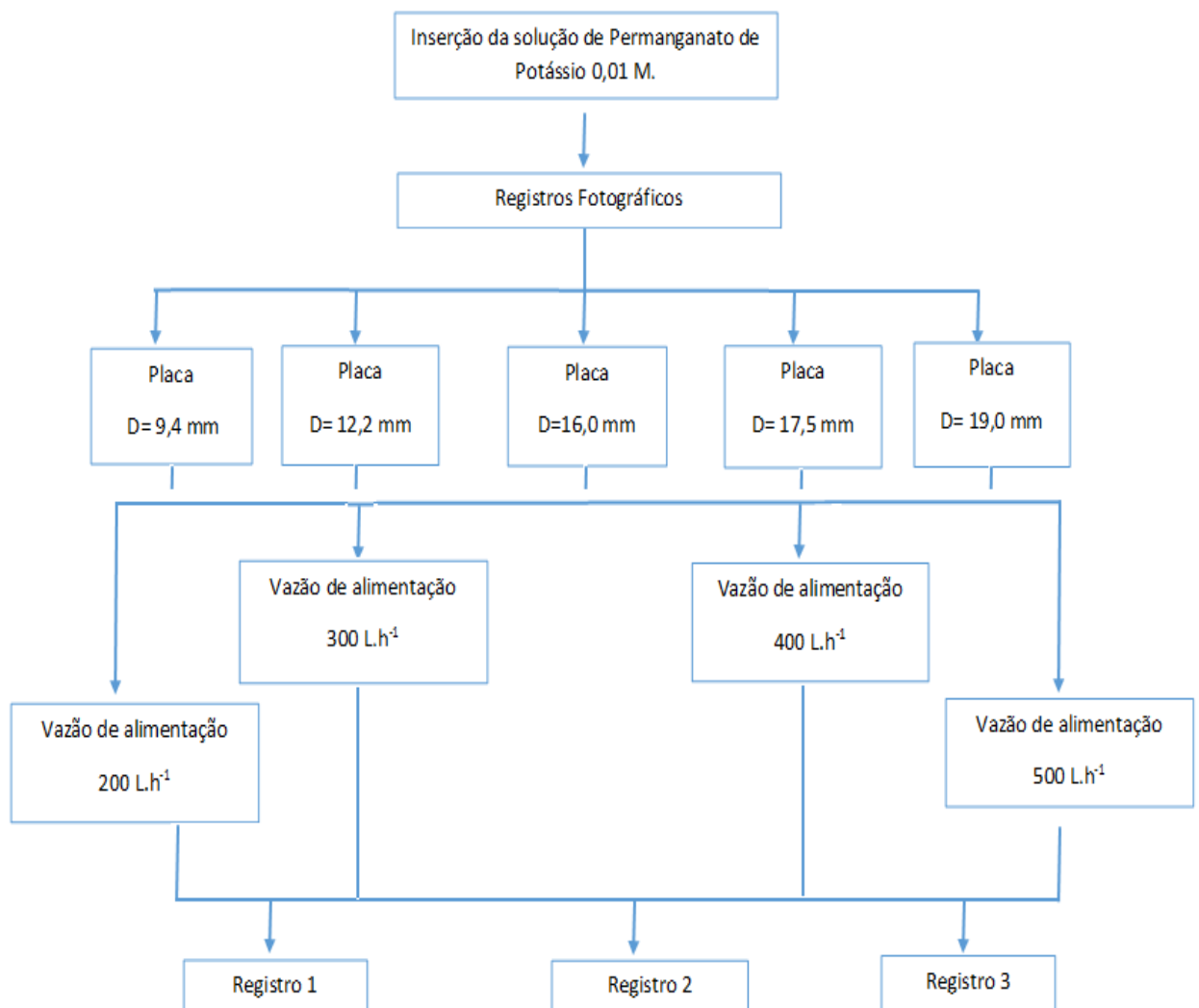
Fonte: O autor.

Na fase de registros dos jatos, o FFAD foi preenchido e alimentado com água tratada para facilitar os registros fotográficos. Posteriormente, ajustou-se a vazão de trabalho e aguardou-se 45 minutos para a estabilização da carga efetiva. Após este tempo, iniciou-se a

inserção do corante na primeira câmara e, simultaneamente, foram realizados os registros fotográficos com uma câmera digital (marca: Fujifilm).

A sequência de ações descritas acima foi realizada para todas as combinações de placas e vazões apresentadas no fluxograma da figura 30. Nesta fase não ocorreu recirculação de água saturada com ar, na alimentação do FFAD.

Figura 30 - Fluxograma das fases de registro do comportamento e alcance dos jatos



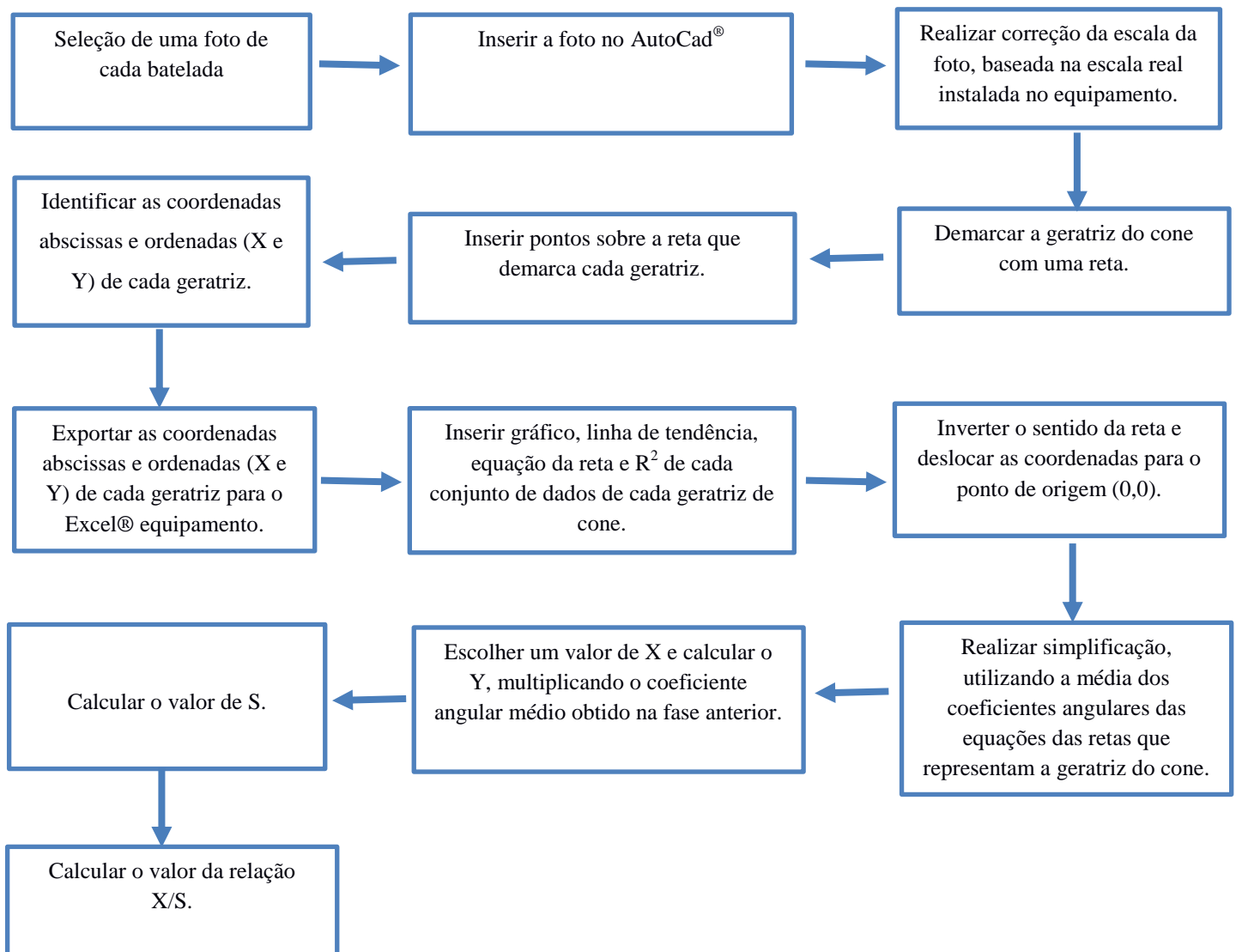
Fonte: O autor.

4.4 Etapa IV - Tratamento dos registros fotográficos.

Nesta etapa da pesquisa foi realizada uma seleção dos registros fotográficos que apresentavam melhor qualidade, delineando com nitidez os jatos formados.

Esta fase tinha como objetivo principal a determinação da distância do ponto de encontro dos jatos. Entretanto, esta intercessão não pode ser registrada em decorrência da dispersão do corante na coluna d'água, sendo, portanto, necessário desenvolver uma metodologia que possibilitasse o aproveitamento dates registros fotográficos. A metodologia desenvolvida é composta das etapas representadas no fluxograma, apresentado na figura 31.

Figura 31 - Fluxograma de procedimentos para tratamento de registros fotográficos.



Fonte: O autor.

A sequência das ações realizadas no desenvolvimento desta fase da pesquisa encontra-se descritas a seguir.

- I- Identificar cada foto selecionada com respectivo diâmetro da placa e vazão aplicada.
- II- Inserir o registro fotográfico no programa AutoCad®.
- III- Se necessário, rotacionar a fotografia utilizando o comando RO.
- IV- Realizar correção da escala da foto, baseada na escala real instalada no equipamento, utilizando o comando SC.
- V- Inserir uma reta demarcando o ponto de origem da formação da pluma, utilizando o comando L.
- VI- Demarcar a geratriz do cone utilizando retas, inseridas utilizando o comando L.
- VII- Inserir pontos sobre a reta que define a geratriz do cone que representa a pluma, igualmente espaçados utilizando os comandos DIV, para a realização da divisão dos segmentos de reta e DDPTYPE para selecionar o design do marcador que representará o ponto.
- VIII- Identificar as coordenadas abscissas e ordenadas (X e Y) de cada ponto, com auxílio do comando ID.
- IX- Exportar as coordenadas abscissas e ordenadas (X e Y) de cada ponto para o programa Excel®, tabelando os valores referentes a cada geratriz.
- X- Inverter o sentido da reta e deslocar as coordenadas para o ponto de origem (0,0), realizando a operação de subtração de todos os pontos com o primeiro valor de X e Y do conjunto de dados.
- XI- Inserir o gráfico, a equação da reta, linha de tendência e coeficiente de correlação (R^2) de cada conjunto de dados que represente cada geratriz de cone.
- XII- Realizar simplificação, utilizando a média dos coeficientes das equações das retas, obtidos na regressão linear dos dados.
- XIII- Escolher um valor de X e calcular o Y, multiplicando o coeficiente linear médio obtido na fase anterior pelo X escolhido.
- XIV- Calcular o valor do alcance da pluma (S).
- XV- Calcular o valor da relação $\frac{X}{S}$.

4.5 Etapa V - Elaboração do projeto do floculador de placas.

A partir do modelo desenvolvido para a determinação da relação $\frac{X}{S}$ e do coeficiente de descarga, foram efetuados os cálculos dos parâmetros hidráulicos necessários para o dimensionamento de um floculador de placas para uma ETA de vazão de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, composto de três câmaras com gradientes hidráulicos gradualmente decrescentes ao longo do percurso horizontal da água. A primeira câmara apresentou gradiente de velocidade dentro do intervalo de 50-40, a segunda 40-30 e a terceira 30-20.

Nesta etapa, também foi elaborado um memorial de cálculos similar ao anterior para o projeto de um floculador de placas utilizado à equação advinda do trabalho realizado por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 528– 533) para a determinação da relação $\frac{X}{S}$, de modo a realizar uma comparação entre os modelos existentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Determinação do coeficiente de descarga.

Os resultados do teste preliminar de determinação do tempo para realização das leituras das cargas hidráulicas encontram-se apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 - Determinação do tempo de estabilização da carga.

Tempo (min)	Carga (mm)
5,0	406,5
10,0	417,6
15,0	423,5
20,0	431,8
25,0	429,5
30,0	435,9
35,0	451,9
40,0	445,5
45,0	443,5
50,0	443,5
55,0	444,0
60,0	443,5

Fonte: O autor.

Com base nos resultados obtidos foi escolhido o tempo de 45 minutos para a realização da primeira leitura de perda de carga em cada vazão e intervalos de 5 minutos entre as triplicatas, posto que não foram verificadas alterações significativas nos tempos posteriores.

As diversas combinações das variáveis vazão e área dos orifícios (e, por conseguinte, o número de Reynolds) propiciaram vinte condições hidráulicas, para as quais foram efetuadas medidas em triplicata do coeficiente de descarga nos orifícios superior (leituras Cd_{1-3}) e inferior (leituras Cd_{4-6}). Os valores obtidos encontram-se apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Condições hidráulicas e coeficientes de descarga obtidos no estudo.

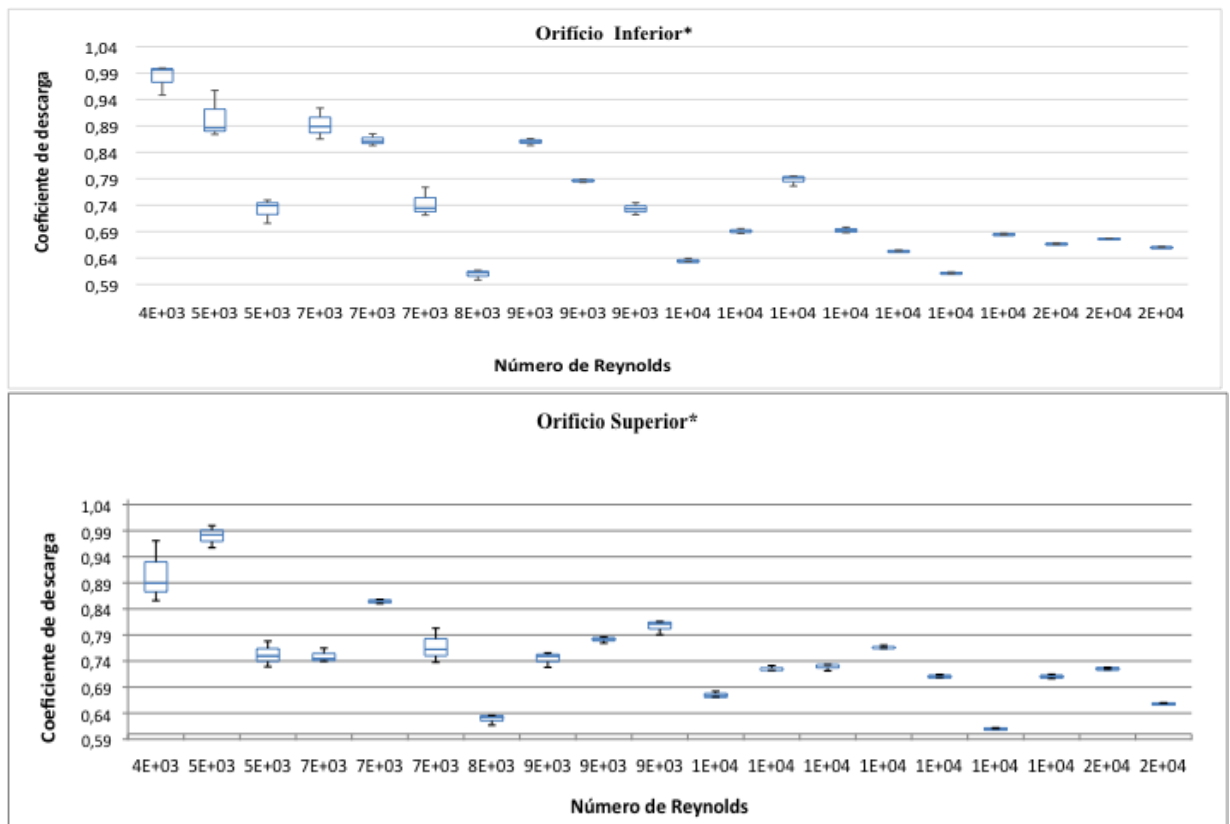
Condições hidráulicas	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Área do orifício (m ²)	Re	Coeficiente de descarga					
				Orifício Superior			Orifício Inferior		
				Cd ₁	Cd ₂	Cd ₃	Cd ₄	Cd ₅	Cd ₆
1	0,00006	0,00028	4477,26	0,9706	0,8896	0,8560	0,9996	0,9971	0,9483
2	0,00006	0,00024	4861,02	0,9573	0,9998	0,9821	0,8739	0,9573	0,8863
3	0,00006	0,00020	5316,74	0,7497	0,7780	0,7292	0,7392	0,7497	0,7057
4	0,00008	0,00028	6575,55	0,7397	0,7445	0,7646	0,8653	0,8890	0,9239
5	0,00006	0,00012	6972,78	0,8502	0,8583	0,8556	0,8529	0,8751	0,8610
6	0,00008	0,00024	7139,17	0,7376	0,8028	0,7625	0,7212	0,7739	0,7342
7	0,00008	0,00020	7808,47	0,6357	0,6342	0,6169	0,5984	0,6128	0,6169
8	0,00011	0,00028	8671,62	0,7556	0,7281	0,7498	0,8530	0,8615	0,8658
9	0,00006	0,00007	9045,17	0,7745	0,7831	0,7860	0,7875	0,7890	0,7831
10	0,00011	0,00024	9414,91	0,7906	0,8131	0,8157	0,7217	0,7329	0,7446
11	0,00008	0,00012	10240,62	0,6818	0,6713	0,6738	0,6343	0,6333	0,6394
12	0,00011	0,00020	10297,55	0,7222	0,7222	0,7313	0,6867	0,6911	0,6956
13	0,00013	0,00028	10767,69	0,7330	0,7330	0,7212	0,7929	0,7951	0,7761
14	0,00013	0,00024	11690,64	0,7646	0,7646	0,7703	0,6921	0,6984	0,6879
15	0,00013	0,00020	12786,64	0,7111	0,7143	0,7088	0,6528	0,6534	0,6553
16	0,00008	0,00007	13284,25	0,6110	0,6104	0,6120	0,6096	0,6136	0,6120
17	0,00011	0,00012	13504,99	0,7146	0,7109	0,7064	0,6870	0,6833	0,6852
18	0,00013	0,00012	16769,36	0,7263	0,7281	0,7238	0,6675	0,6688	0,6655
19	0,00011	0,00007	17518,82	0,6590	0,6599	0,6592	0,6774	0,6775	0,6770
20	0,00013	0,00007	21753,40				0,6616	0,6610	0,6606

Fonte: O autor.

Os resultados da tabela 11 são condizentes com o comportamento previsto pela equação 16 para determinação do coeficiente de descarga, segundo a qual o C_d varia em função da vazão, carga e área do orifício. O comportamento observado é confirmado por Porto (2006, p. 357), que afirma que o coeficiente C_d em geral não é constante para um dado orifício, variando com a carga, as condições de afluxo e a viscosidade do líquido.

A partir dos valores de C_d , apresentados na tabela 11, foram gerados os gráficos *boxplot*, que correlacionam o coeficiente de descarga com o número de Reynolds para o orifício inferior e superior, ilustrados na figura 32.

Figura 32 – Gráficos *boxplot* do coeficiente de descarga correlacionados com o número de Reynolds para o orifício inferior e superior.



Fonte: O autor

* Os valores representados em cada condição hidráulica correspondem às triplicatas realizadas nos orifícios superior (Cd_{1-3}) e inferior (Cd_{4-6}), apresentadas na tabela 3.

Uma análise dos gráficos apresentados na figura 32 permite inferir que, quando comparadas entre si, as respectivas condições hidráulicas evidenciam um comportamento semelhante. Conforme detalhado a seguir, observa-se também que na primeira metade dos gráficos, onde os números de Reynolds variaram entre 4.477,26 e 9.414,91, 30% das medidas foram originadas na placa cujos orifícios possuem área de $2,834 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ e diâmetro de 19 mm e vazões de $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ (200 L.h}^{-1}\text{)}$, $8,2 \cdot 10^{-5} \text{ (300 L.h}^{-1}\text{)}$, e $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ (400 L.h}^{-1}\text{)}$. O restante das leituras foram realizadas nas demais áreas dos orifícios avaliados e, principalmente, na vazão de $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ (200 L.h}^{-1}\text{)}$. Na segunda metade dos dados, com números de Reynolds variando de 9414,91 a 21753,40, observaram-se baixas amplitudes entre os valores das triplicatas enquanto que na primeira metade foram observadas amplitudes maiores. Este comportamento foi observado tanto para os experimentos no orifício superior quanto no inferior.

O comportamento descrito anteriormente leva a crer que a variabilidade observada nos valores de C_d pode ter sido ocasionada por fatores como a instabilidade do sistema de alimentação do floculador de placas, possíveis erros de mensuração, principalmente nas medidas de vazão, já que $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($200 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$) era o limite inferior da escala do rotâmetro usado. Outros fatores que podem ter contribuído para as diferenças observadas nas medições são, a espessura da placa e do orifício, a retilineidade e planeza, bem como fatores referentes à tolerância de forma, e à microgeometria como a rugosidade. A influência de tais fatores é relatada por Silva (2007, p. 11).

Tendo em vista as variações observadas nos gráficos *boxplot*, apresentado na figura 32, sinalizando uma provável interferência de *outliers*, foi aplicado o critério *Z score* (apresentado na tabela 12), técnica estatística que permite comparar de uma forma padronizada os desvios entre os valores obtidos e os previstos pelo modelo proposto, visando detectar e possibilitar a retirada de medidas discrepantes do conjunto de dados.

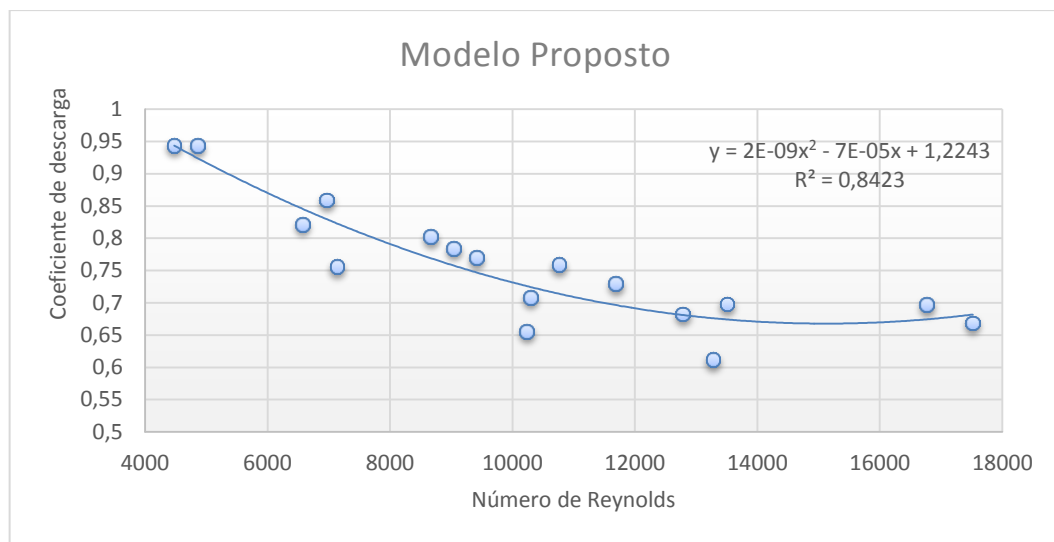
Tabela 12 – Análise de *Z score* para os dados de coeficiente de descarga.

Re	C_d Médio	C_d Calculado	Erro	<i>Z score</i>
4477,26	0,9436	0,9441	-0,0005	0,0996
4861,02	0,9428	0,9285	0,0143	0,2815
5316,74	0,7419	0,9103	-0,1684	-1,9591
6575,55	0,8211	0,8624	-0,0412	-0,3994
6972,78	0,8588	0,8479	0,0110	0,2405
7139,17	0,7554	0,8419	-0,0865	-0,9550
7808,47	0,6191	0,8184	-0,1993	-2,3380
8671,62	0,8023	0,7895	0,0128	0,2631
9045,17	0,7839	0,7775	0,0064	0,1846
9414,91	0,7698	0,7658	0,0040	0,1547
10240,62	0,6557	0,7407	-0,0851	-0,9372
10297,55	0,7082	0,7391	-0,0309	-0,2728
10767,69	0,7586	0,7255	0,0331	0,5119
11690,64	0,7296	0,7000	0,0296	0,4690
12786,64	0,6826	0,6721	0,0105	0,2353
13284,25	0,6114	0,6602	-0,0487	-0,4914
13504,99	0,6979	0,6550	0,0429	0,6317
16769,36	0,6967	0,5906	0,1060	1,4062
17518,82	0,6683	0,5789	0,0895	1,2032
21753,40	0,6611	0,5334	0,1277	1,6716

Fonte: O autor.

O critério aplicado na análise do *Z score* dos valores de C_d partiu da premissa de que quando o conjunto de dados atende à distribuição normal, desvios maiores que um determinado valor de *Z score*, a um dado nível de confiança, sinaliza valores atípicos. Na análise que procedemos foram considerados *outliers* os desvios com *Z score* superiores à $\pm 1,64$ ao nível de confiança de 90%. Após a retirada dos *outliers* detectados, e, visando à validação estatística dos dados, foi traçada uma curva (figura 33) correlacionando os valores de C_d com os respectivos números de Reynolds.

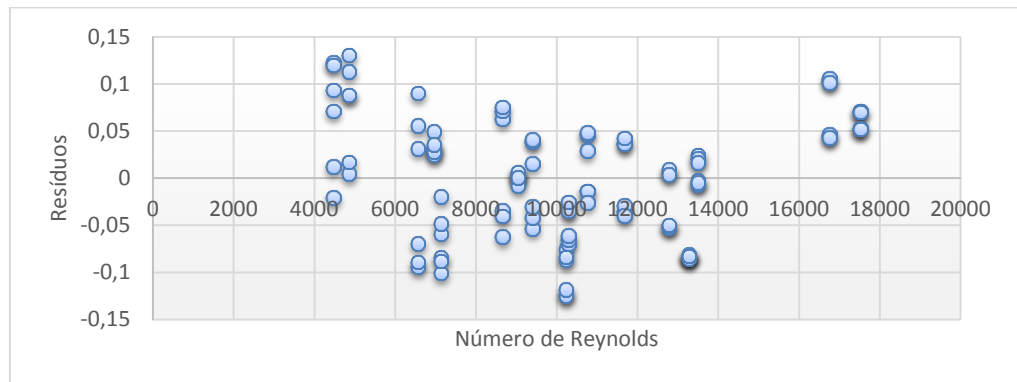
Figura 33 – Modelo proposto para determinação de coeficiente de descarga após a remoção de *outliers*



Fonte: O autor.

Uma vez obtido o modelo, representado graficamente na figura 33, foi verificada a adequação do mesmo mediante o procedimento da análise de resíduos, gerando o gráfico apresentado na figura 34. Para tanto, admitiu-se como hipótese que os erros ou resíduos (diferença entre os valores obtidos e os previstos) têm distribuição normal, com média e variância constantes. Desta forma, espera-se que o gráfico de probabilidade normal, apresentado na figura 35, represente uma relação linear, indicando que o modelo é adequado.

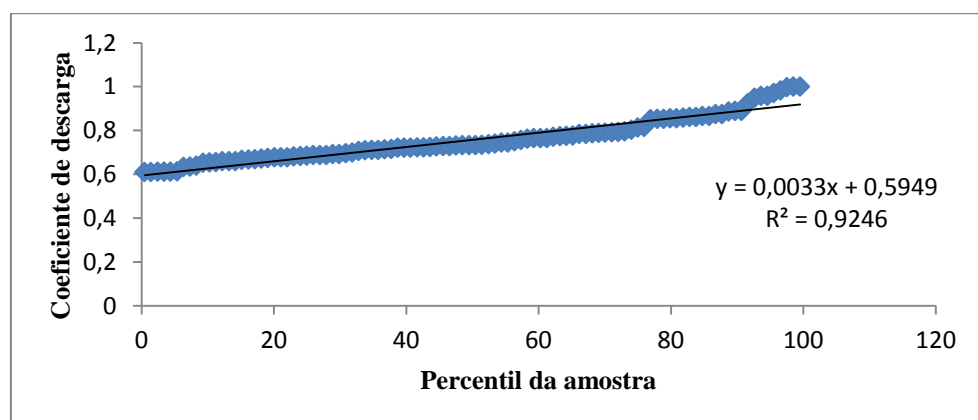
Figura 34 - Gráficos dos resíduos do modelo de determinação de coeficiente de descarga.



Fonte: O autor.

Ao avaliar o gráfico apresentado na figura 34, observa-se que a maior parte dos resíduos se distribui aleatoriamente em torno da média, e que a média destes resíduos, de um modo geral, apresenta-se muito próxima de zero, sendo estas duas condições, dois requisitos essenciais para que o modelo seja considerado adequado. Outra conclusão retirada a partir da análise realizada no gráfico de resíduos é que apesar dos dados de C_d não apresentarem uma variância constante ao longo da faixa de número de Reynolds avaliada, este fato não invalida o modelo obtido e ilustra a instabilidade que foi observada no sistema no decorrer do desenvolvimento desta etapa. Em complemento à análise de resíduos, foi efetuada a plotagem de probabilidade normal, ilustrada na figura 35, com intuito de avaliar o comportamento dos dados de C_d .

Figura 35 - Gráfico de probabilidade normal.



Fonte: O autor.

Ao analisar o gráfico de probabilidade normal, ilustrado na figura 35 observa-se uma tendência linear, com R^2 igual a 0,9246. Com isso, pode-se concluir que os resíduos apresentam distribuição normal.

O modelo apresentado para a determinação do coeficiente de descarga é válido para a faixa número de Reynolds compreendida entre 4.000 e 18.000. Tal condição limitou a utilização do modelo proposto, posto que fora desta faixa o modelo apresenta resultados incompatíveis com as medições reais. Em decorrência deste fato, faz-se necessário realizar um estudo abrangendo uma faixa mais extensa de número de Reynolds, dado que os valores de gradiente de velocidade normalmente empregados na floculação, implicam em números de Reynolds superiores ao limite atendido pelo modelo.

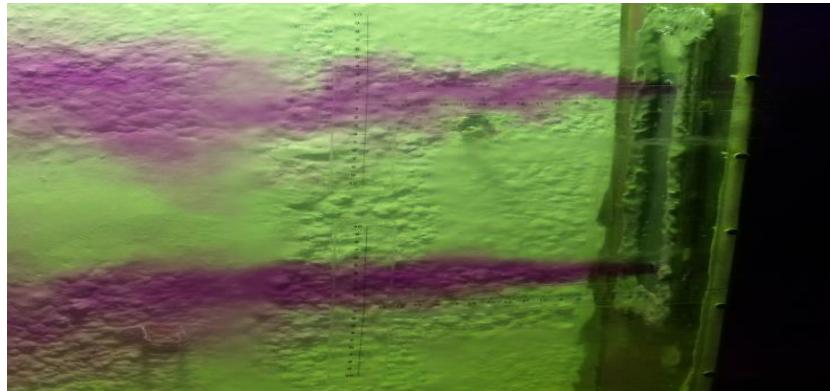
Outro procedimento estatístico realizado após a retirada dos *outliers* detectados foi o cálculo da média populacional (μ), bem como seu intervalo de confiança, calculado com base na média amostral (X), aplicando-se os seguintes valores: $N= 103$, 102 graus de liberdade, a um nível de confiança de 95%, para o qual o parâmetro t de *Student* é igual a 1,980. Obteve-se com esse procedimento a seguinte estimativa para o coeficiente de descarga (C_d): **0,758 \pm 0,019**. Corroborando esses resultados, estudos conduzidos por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 530), relataram valores de C_d entre 0,8 e 0,90 (para um intervalo de número de Reynolds compreendido entre 13.570 e 26.730), muito próximos dos obtidos no presente trabalho.

Observa-se que o valor de C_d obtido diverge do valor de 0,61, amplamente difundido na literatura, conforme apresentado por Neves (1977, p.110), Porto (2006, p. 352) e Azevedo Netto (2015, p. 76). Por outro lado, Vianna e Castro (2014, p. 40) e Vianna *et al.* (2015, p. 6) afirmam que o valor de 0,61 para coeficiente de descarga não se aplica nas situações em que as velocidades médias e o número de Reynolds baixos (500 a 11000), condições estas, semelhantes às que foram aplicadas neste experimento.

5.2 Determinação da distância do ponto de encontro dos jatos.

Ao longo da etapa IV foram efetuados registros do comportamento e alcance dos jatos para cada combinação de vazão e área dos orifícios, tendo sido realizado em torno de 2.300 registros fotográficos, similares ao que se encontra ilustrado na figura 36.

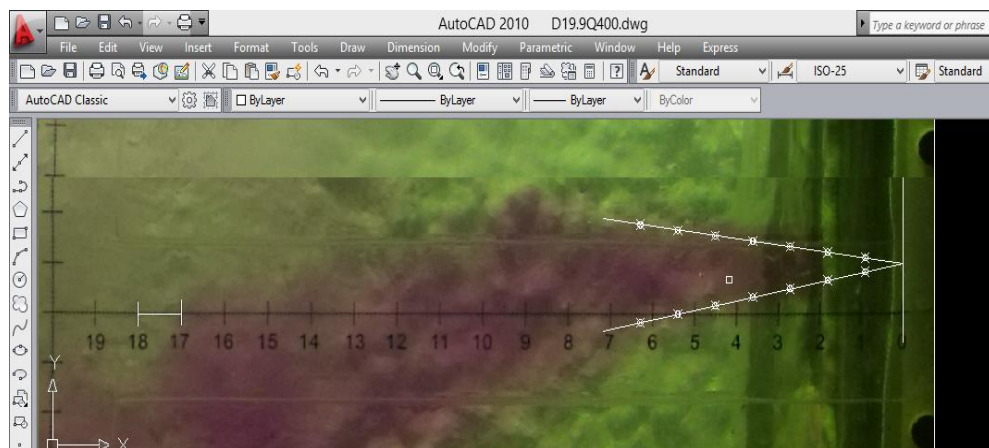
Figura 36 – Registro fotográfico de um jato.



Fonte: O autor.

Dentre os diversos registros fotográficos obtidos, foram selecionadas 60 fotografias para o desenvolvimento da etapa IV, descrita na metodologia, tendo como critério a nitidez da imagem. Tendo em vista que o objetivo principal desta etapa da pesquisa era determinar o ponto de encontro das plumas, o que não foi possível devido à dispersão dos jatos, devido à difusão da solução de permanganato de potássio, antes do ponto de encontro, desenvolveu-se a metodologia descrita na etapa IV, a qual possibilitou delinear as geratrizes dos cones, utilizando o *software* AutoCad[®], conforme ilustrado na figura 37.

Figura 37 – Geratrizes dos cones delineadas no AutoCad[®].



Fonte: O autor.

Após a demarcação dos pontos constituintes das geratrizes dos cones, os valores de suas coordenadas foram inseridos no Excel[®], onde se desenvolveram os procedimentos IX ao XV. Nesta fase da etapa IV, foram gerados os valores da distância da interferência entre os

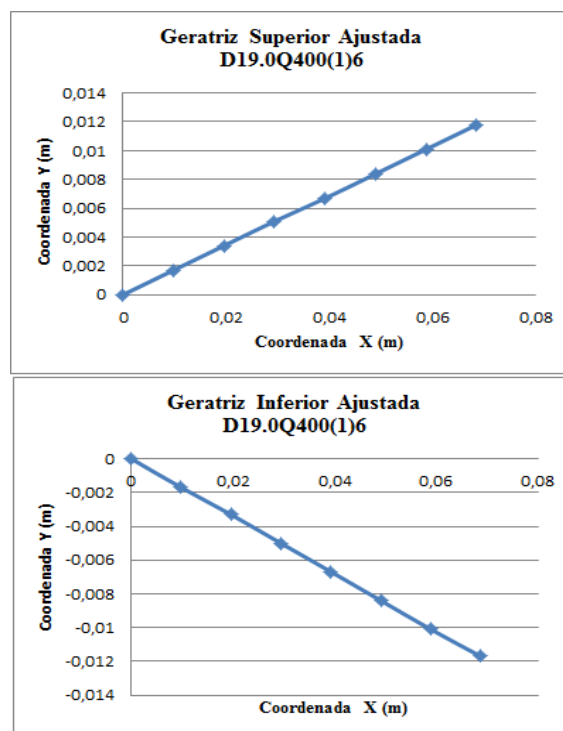
atos (X), espaçamento entre os orifícios (S) e a relação $\frac{X}{S}$. Os resultados obtidos para a fotografia da figura 37 são exibidos nas tabelas 13 e 14, sendo a representação gráfica ilustrada na figura 38. Esse mesmo procedimento foi repetido para as outras 59 fotografias.

Tabela 13 – Coordenadas X e Y das geratrizes de um cone.

Foto: D19.0Q400(1).6			
Geratriz superior		Geratriz inferior	
Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
0	0	0	0
0,0098	0,0017	0,0098	-0,0017
0,0196	0,0034	0,0196	-0,0033
0,0294	0,0051	0,0294	-0,005
0,0393	0,0067	0,0393	-0,0067
0,0491	0,0084	0,0491	-0,0084
0,0589	0,0101	0,0589	-0,0101
0,0687	0,0118	0,0687	-0,0117

Fonte: O autor.

Figura 38 – Representação gráfica das geratrizes do cone.



Fonte: O autor.

Tabela 14 – Determinação dos valores de S e $\frac{X}{S}$.

X (m)	Y (m)	S (m)	$\frac{X}{S}$
0,0086	0,00147	0,00294	2,9240

Fonte: O autor.

O tratamento dos registros fotográficos possibilitou estabelecer a relação $\frac{X}{S}$, cujas réplicas, juntamente com número de Reynolds associado às mesmas, encontram-se na tabela 15.

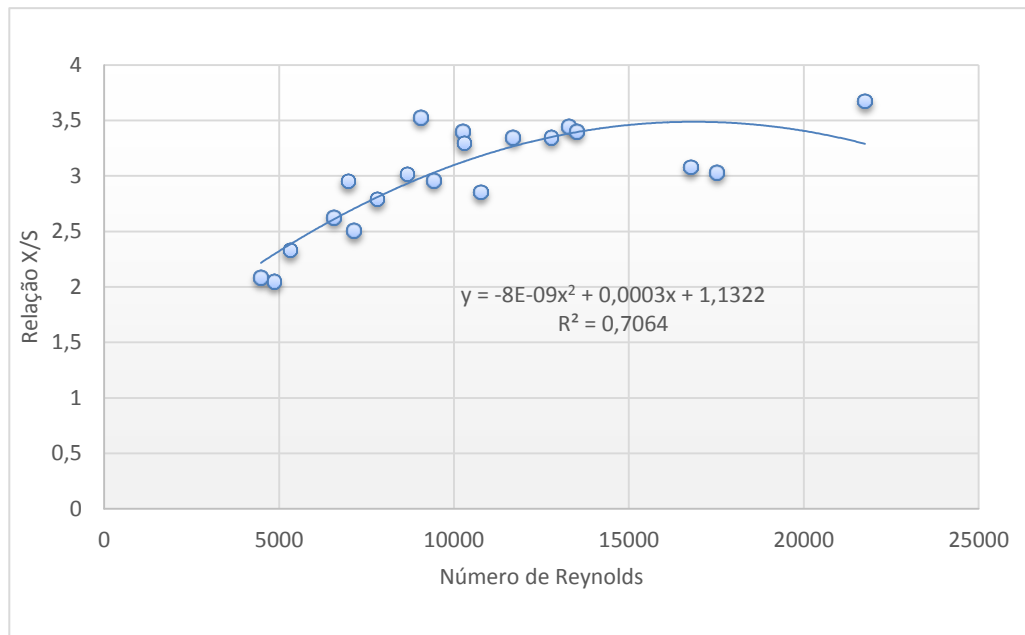
Tabela 15 – Valores de $\frac{X}{S}$ em função de Re .

Re	$\frac{X}{S} 1$	$\frac{X}{S} 2$	$\frac{X}{S} 3$	$\frac{X}{S}$ (média)	Desvio padrão
9045,17	3,6153	3,3080	3,6630	3,5288	0,192671
13284,25	3,4118	3,4977	3,4282	3,4459	0,045603
17518,82	3,0377	3,0349	3,0331	3,0352	0,002318
21753,40	3,5336	3,7594	3,7341	3,6757	0,123711
6972,78	2,9231	2,8927	3,0432	2,9530	0,079581
10240,62	3,6114	3,1918	3,3864	3,3965	0,209983
13504,99	3,2895	3,7679	3,1516	3,4030	0,323447
16769,36	2,9146	3,0351	3,2802	3,0766	0,186305
5316,74	2,3474	2,4349	2,2168	2,3330	0,109757
7808,47	2,6233	2,9481	2,8011	2,7908	0,162643
10297,55	3,1476	3,3245	3,4200	3,2974	0,138212
12786,64	3,3523	3,3434	3,3467	3,3475	0,004499
4861,02	1,9736	2,0829	2,0838	2,0467	0,063366
7139,17	2,5069	2,5082	2,5056	2,5069	0,0013
9414,91	2,9586	2,9913	2,9351	2,9617	0,028225
11690,64	3,3501	3,3490	3,3495	3,3495	0,000551
4477,26	2,0346	2,1501	2,0734	2,0860	0,058777
6575,55	2,9429	2,4673	2,4697	2,6267	0,273898
8671,62	2,9240	3,1075	3,0202	3,0172	0,091786
10767,69	2,9833	2,9500	2,6371	2,8568	0,190993

Fonte: O autor.

A partir desses dados, e, seguindo procedimento proposto por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 530), obteve-se a relação entre os valores médios de $\frac{X}{S}$ em função do número de Reynolds, conforme ilustrado na figura 39.

Figura 39 – Modelo para determinação da relação $\frac{X}{S}$ com presença de *outliers* .



Fonte: O autor.

Analisando a regressão apresentada na figura 39, observa-se a presença de pontos consideravelmente discrepantes com relação à linha de tendência traçada, sinalizando uma provável interferência de *outliers*, resultando em um baixo coeficiente de correlação ($R^2 = 0,7064$). Em virtude disso, os referidos valores médios da relação $\frac{X}{S}$ foram submetidos à aplicação do critério *Z score* ou *score* padronizado (tabela 16), técnica que realiza uma comparação entre os valores obtidos e os previstos pelo modelo (sem a influência de *outliers*), visando à padronização dos desvios.

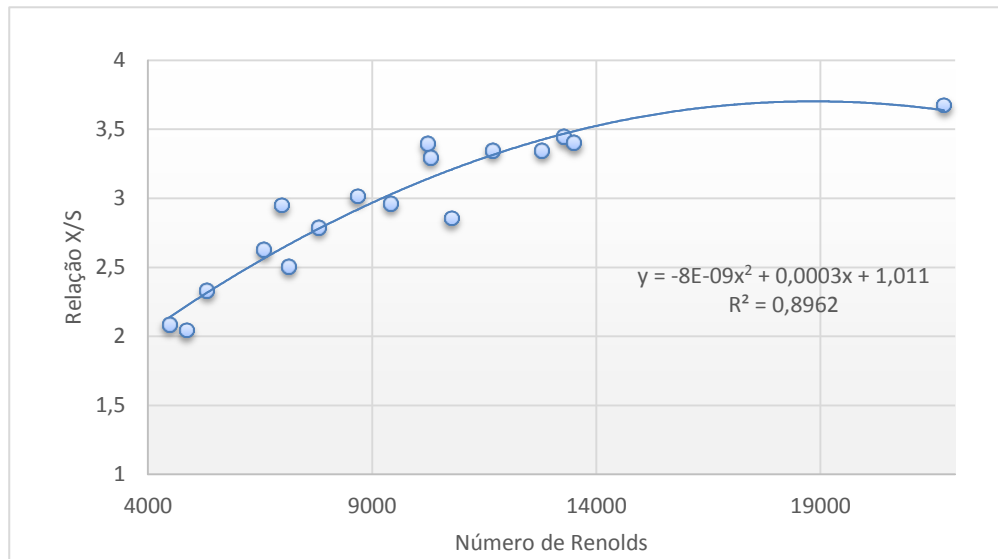
Tabela 16 – Verificação de *outliers* pelo critério *Z score*.

Número de Reynolds	$\frac{x}{s}$ Obtido	$\frac{x}{s}$ Esperado	Erro	<i>z-score</i>
4477,26	2,0860	2,3065	-0,2205	0,0784
4861,02	2,0467	2,3930	-0,3462	-0,3636
5316,74	2,3330	2,4926	-0,1596	0,2925
6575,55	2,6267	2,7505	-0,1238	0,4182
6972,78	2,9530	2,8266	0,1264	1,2977
7139,17	2,5069	2,8577	-0,3508	-0,3797
7808,47	2,7908	2,9785	-0,1876	0,1939
8671,62	3,0172	3,1236	-0,1064	0,4794
9045,17	3,5288	3,1827	0,3460	2,0695
9414,91	2,9617	3,2390	-0,2774	-0,1215
10240,62	3,3965	3,3569	0,0396	0,9926
10297,55	3,2974	3,3646	-0,0673	0,6168
10767,69	2,8568	3,4265	-0,5697	-1,1488
11690,64	3,3495	3,5375	-0,1880	0,1926
12786,64	3,3475	3,6517	-0,3042	-0,2160
13284,25	3,4459	3,6972	-0,2513	-0,0299
13504,99	3,4030	3,7161	-0,3131	-0,2472
16769,36	3,0800	3,9048	-0,8248	-2,0456
17518,82	3,0352	3,9241	-0,8889	-2,2707
21753,40	3,6757	3,8640	-0,1883	0,1914

Fonte: O autor.

O cálculo do *z score* foi realizado considerando um intervalo de confiança de 90%. Com isso, os valores de *z score* que se apresentaram fora do intervalo $-1,64 < z < +1,64$ foram considerados *outliers*, sendo, portanto, retirados do conjunto de dados. Logo após a remoção dos *outliers*, elaborou-se uma nova regressão com o conjunto de dados tratados (figura 40).

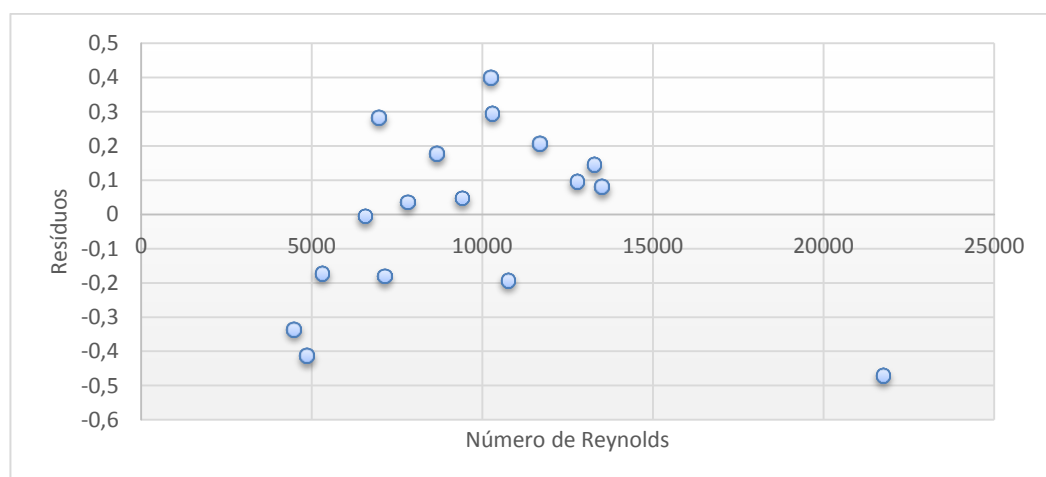
Figura 40 – Modelo para a determinação da relação $\frac{X}{S}$ após a remoção de *outliers*.



Fonte: O autor.

Posteriormente, visando avaliar a adequabilidade do modelo de regressão obtido, apresentado na figura 40, foi realizada uma análise de resíduos que deu origem ao gráfico apresentado na figura 41.

Figura 41 – Gráfico dos resíduos do modelo para a determinação da relação $\frac{X}{S}$.

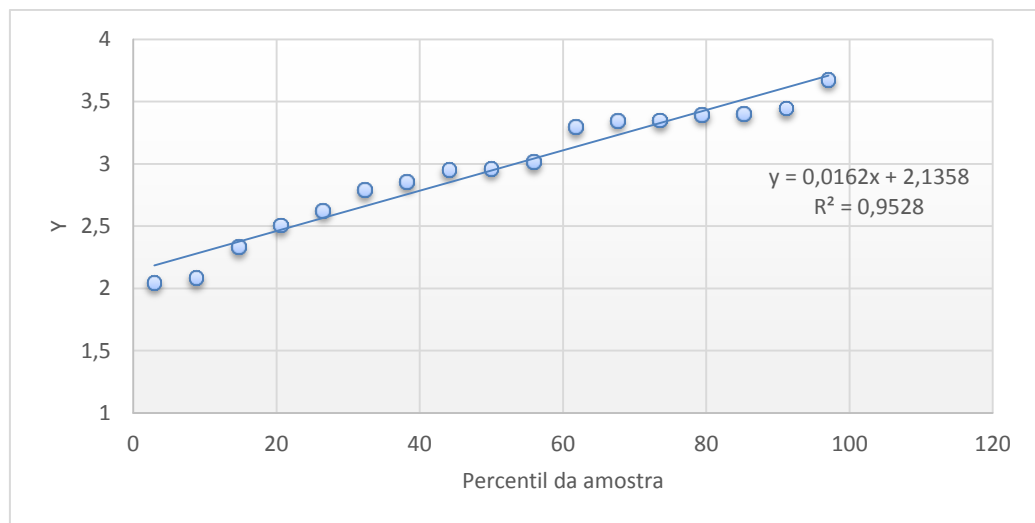


Fonte: O autor.

A análise gráfica dos resíduos possibilita concluir que os resíduos se distribuem aleatoriamente e próximos da reta $x=0$, dois requisitos essenciais para que o modelo seja considerado adequado.

Em complemento à análise de resíduos, foi elaborado um gráfico de probabilidade normal, ilustrada na figura 42, com intuito de avaliar o comportamento dos dados de $\frac{X}{S}$.

Figura 42 – Gráfico de probabilidade normal.

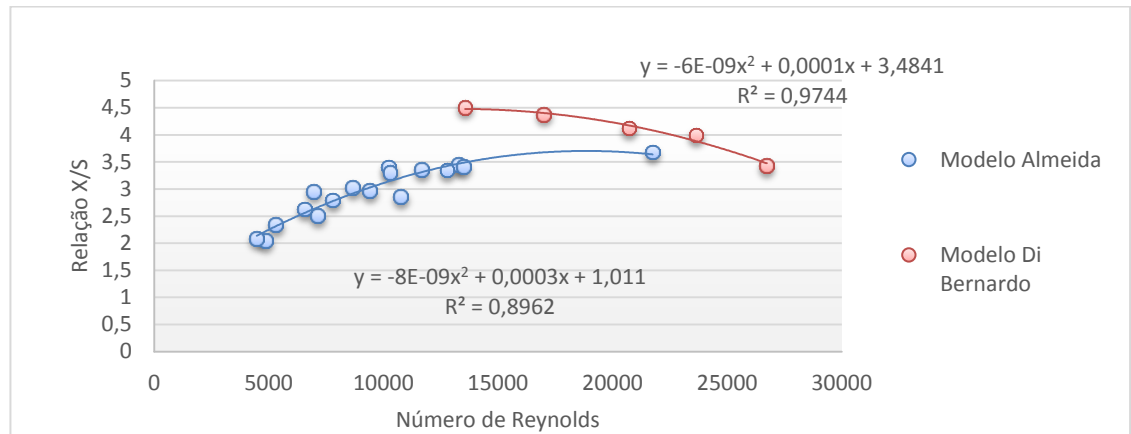


Fonte: O autor.

Ao analisar o gráfico de probabilidade normal, observa-se uma acentuada tendência linear. Com isso pode-se concluir que os resíduos apresentam distribuição normal, sendo esta uma condição essencial para que o modelo seja considerado adequado. É fato que os valores de $\frac{X}{S}$ não apresentam uma variância constante ao longo da faixa de Reynolds avaliada como observado na figura 41, ou seja, os resíduos não apresentaram uma distribuição homogênea entre os dois quadrantes (positivo e negativo do eixo Y), entretanto, face ao ótimo valor de R^2 obtido (0,9528) pode-se afirmar que o modelo matemático posposto é considerado estatisticamente válido.

Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 530), em estudos realizados com orifícios hidráulicos obteve a relação entre os valores médios de $\frac{X}{S}$ em função do número de Reynolds. Estes estudos foram realizados em condições hidráulicas de número de Reynolds numa faixa de 13.570 e 26.730 obtida em orifícios com diâmetro entre 50 e 125 mm e vazões variando entre 84 e 218 $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Os resultados de $\frac{X}{S}$ obtidos são apresentados a seguir, na figura 43.

Figura 43 – Curva dos modelos de determinação de $\frac{X}{S}$ em função de Reynolds para orifícios.



Fonte: Adaptado pelo autor.

Ao comparar os dois estudos realizados, observa-se que Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 530) estudaram a relação $\frac{X}{S}$ num intervalo de número de Reynolds mais elevado, de 13.570 a 26.730, enquanto que o presente estudo apresentou resultados para intervalo de número de Reynolds mais baixos de 4.477,26 a 21753,40.

Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535), relataram entre as conclusões do trabalho realizado com orifícios hidráulicos, que para um mesmo número de Reynolds, o valor de $\frac{X}{S}$ é praticamente constante. No presente estudo foi observado um comportamento semelhante em mais de 60% dos valores de $\frac{X}{S}$.

5.3 Dimensionamento do floculador de placas de orifícios.

De forma a aplicar o modelo obtido para a determinação da relação $\frac{X}{S}$ e do coeficiente de descarga, apresentados anteriormente, elaborou-se o projeto de um floculador hidráulico de placas de orifícios, componente do FFAD. A planilha contendo os parâmetros e dados de projeto encontram-se apresentada na tabela 18.

O floculador de placa de orifícios foi dimensionado com três câmaras com gradientes hidráulicos gradualmente decrescentes ao longo do percurso horizontal da água. A primeira câmara apresentou gradiente de velocidade dentro do intervalo de 50-40, a segunda 40-30 e a terceira 30-20.

A fim de realizar uma comparação entre a formulação matemática proposta por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) e o modelo proposto neste estudo para a determinação da relação $\frac{X}{S}$, o dimensionamento do floculador de placas de orifícios foi realizado nas mesmas condições (vazão de alimentação, dimensões do floculador, quantidade de orifícios, coeficiente de descarga, entre outros) para ambos os modelos, conforme apresentado na tabela 17.

Tabela 17 - Dimensionamento de um floculador de placas utilizando os modelos de por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) e Almeida (2016) e coeficiente de descarga 0,758.

Parâmetro	Valor						Unidade
Características da água a 25° C							
Viscosidade cinemática	8,975E-07						m ² /s
Cálculo das dimensões do floculador							
Vazão do ETA	100						m ³ /h
Tempo de detenção no floculador	20						min
Volume do floculador	33,33						m ³
Número de canais	1						
Altura da lâmina d'água	4						m
Comprimento do floculador	4						m
Largura do floculador	2,08						m
Cálculo para determinação do gradiente de velocidade							
Coeficiente de descarga adotado	0,758						
Quantidade de orifícios na horizontal	3						
Quantidade de orifícios na vertical	5						
Espaçamento entre orifícios S (eixo a eixo)	0,69						m
Total de orifícios	15						
	Modelo Almeida (2016)			Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535)			
	1° Placa	2° Placa	3° Placa	1° Placa	2° Placa	3° Placa	
Diâmetro do orifício	68	70	73	80	82	84	mm
Vazão em cada orifício (Qo)	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	m ³ /s
Velocidade em cada orifício (U)	0,51017	0,48144	0,44268	0,36860	0,35084	0,33433	m/s
Número de Reynolds	38653,89	37549,49	36006,36	32855,81	32054,45	31291,24	
Relação X/S	0,65	1,00	1,44	0,29	0,52	0,74	
Alcance do jato (Xo)	0,45	0,69	1,00	0,20	0,36	0,51	m
Gradiente de Velocidade (G)	46,19	35,32	27,00	49,89	35,47	28,49	s ⁻¹

Fonte: O autor.

Ao avaliar os dados apresentados na tabela 18, percebe-se que, quando aplicado o modelo de Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) foi necessário ampliar os diâmetros dos orifícios utilizados nas placas das três câmaras de floculação, a fim de garantir os intervalos de gradiente de velocidade estipulados. Também é possível observar que o alcance dos jatos utilizando o modelo de Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) é inferior aos obtidos utilizando o modelo obtido neste estudo em cerca de 50%. É importante, que este parâmetro seja levado em conta tendo em vista que o alcance do jato determina o distanciamento entre as placas, que quando muito próximas pode comprometer a manutenção e limpeza do floculador.

Quando comparados, os números de Reynolds obtidos para cada câmara em ambos os modelos, estes se apresentaram na mesma faixa, entre 30.000 e 40.000. Quanto às velocidades de passagem de fluído nos orifícios, no dimensionamento realizado utilizando o modelo obtido neste trabalho, variaram entre 0,51 e 0,44, valores um pouco superiores aos resultados utilizando o modelo Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535), fato ocasionado pelas diferenças de diâmetros aplicados nos das placas.

De modo a realizar uma comparação quanto à influência do coeficiente de descarga no gradiente de velocidade foi elaborada uma nova planilha com o dimensionamento do floculador de placas de orifícios, anteriormente apresentado, alterando apenas o valor de C_d . No dimensionamento apresentado na tabela 17 foi utilizado um valor médio de C_d igual a 0,758, obtido no presente estudo, enquanto que na tabela 18, foi utilizado o valor 0,61, amplamente divulgado na literatura especializada.

Tabela 18 - Dimensionamento de um flocculador de placas utilizando os modelos de por Di Bernardo e Giorgetti (1980, p. 535) e Almeida (2016) e coeficiente de descarga 0,61.

Parâmetro	Valor						Unidade
Características da água a 25° C							
Viscosidade cinemática	8,975E-07						m ² /s
Cálculo das dimensões do flocculador							
Vazão do ETA	100						m ³ /h
Tempo de detenção no flocculador	0,333						h
Volume do flocculador	33,33						m ³
Número de canais	1						
Altura da lâmina d'água	4						m
Comprimento do flocculador	4						m
Largura do flocculador	2,08						m
Cálculo para determinação do gradiente de velocidade							
Coefficiente de descarga adotado	0,61						
Quantidade de orifícios na horizontal	3						
Quantidade de orifícios na vertical	5						
Espaçamento entre orifícios (eixo a eixo)	0,69						m
Total de orifícios	15						
	Modelo Almeida (2016)			Bernardo & Giorgetti (1980, p. 535)			
	1° Placa	2° Placa	3° Placa	1° Placa	2° Placa	3° Placa	
Diâmetro do orifício	68	70	73	80	82	84	mm
Vazão em cada orifício (Qo)	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	0,00185	m ³ /s
Velocidade em cada orifício (U)	0,51017	0,48144	0,44268	0,36860	0,35084	0,33433	m/s
Número de Reynolds	38653,89	37549,49	36006,36	32855,81	32054,45	31291,24	
Relação X/S	0,65	1,00	1,44	0,29	0,52	0,74	
Alcance do jato (Xo)	0,45	0,69	1,00	0,20	0,36	0,51	m
Gradiente de Velocidade (G)	57,39	43,89	33,55	62,00	44,07	35,40	s ⁻¹

Fonte: O autor.

Ao analisar as tabelas 17 e 18 observa-se que os valores dos gradientes de velocidade são maiores no dimensionamento que utiliza 0,61 como coeficiente de descarga, comportamento esperado, tendo em vista que o C_d é inversamente proporcional a G. Além disso, foi possível diagnosticar um erro relativo médio de cerca de 19,5 % quando comparados os valores dos gradientes de velocidade calculados com valores de C_d distintos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo está fundamentado numa quantidade significativa de experimentos, executados sob diversas condições hidráulicas. Com base nos mesmos, foi possível desenvolver um modelo matemático para o cálculo do coeficiente de descarga (C_d) numa faixa de baixos números de Reynolds compreendida entre 4.000 e 18.000. Além do modelo, também foi calculada a média populacional e seu intervalo de confiança, com base numa média amostral em torno de 120 valores de coeficiente de descarga verificados, obtendo-se o valor de $0,758 \pm 0,019$. Os resultados obtidos são coerentes e complementares, quando comparados com os dados difundidos atualmente na literatura especializada, representando uma contribuição efetiva ao estudo da hidráulica, não somente em flocladores, mas em aplicações diversas tais como medição de vazão em reservatórios, tendo em vista que a utilização de valores inadequados do parâmetro C_d pode implicar em erros no estabelecimento dos gradientes de velocidade, quando do dimensionamento dos flocladores de placas, comprometendo a eficiência do processo de floclação.

A metodologia desenvolvida para a determinação do parâmetro $\frac{X}{S}$ mostrou-se eficiente e propiciou o estabelecimento das correlações com o número de Reynolds, possibilitando a modelagem do comportamento dos jatos em termos do alcance dos mesmos, sendo esta uma informação crucial para o correto dimensionamento da unidade de floclação.

As correlações estabelecidas foram submetidas ao tratamento estatístico de análise de resíduos visando à validação dos modelos obtidos para a determinação de desses parâmetros hidráulicos, tendo sido verificado no referido tratamento que os modelos propostos encerram um bom nível de confiabilidade com relação à sua capacidade de previsão dos comportamentos dos coeficientes de descarga dentro do intervalo de número de Reynolds determinado e da relação $\frac{X}{S}$.

O dimensionamento de um floclador de placas efetuado com base na modelagem desenvolvida no presente estudo propiciou a obtenção de parâmetros tais como gradiente de velocidade, tempo de floclação, velocidade de passagem pelos orifícios, dentre outros, compatíveis com os preconizados pelas recomendações de projeto de flocladores, como, por exemplo, a norma ABNT NBR 12.216:1992.

A checagem do modelo mediante a variação do parâmetro coeficiente de descarga, aplicando-se os valores 0,758 (obtido no presente estudo) e 0,61 (vigente na

literatura), mantendo os outros parâmetros iguais, produziu gradientes de velocidades com diferenças de cerca de 19,5 % quando comparados os valores calculados com valores de C_d distintos, verificando assim a importância da utilização de um coeficiente de descarga compatível com a condição hidráulica desejada.

Quando comparados os dimensionamentos dos flocladores de placas utilizando o modelo proposto neste estudo e o apresentado por Di Bernardo & Giorgetti (1980, p. 535), verificou-se que para manter o gradiente de velocidade dentro dos intervalos determinados para cada câmara de floclação foi necessário utilizar diâmetros maiores no dimensionamento utilizando o modelo de Di Bernardo & Giorgetti, implicando assim em jatos mais curtos, fator este que determina o distanciamento entre as placas de orifícios responsáveis pela floclação, que quando muito próximas, podem vir a comprometer a manutenção e limpeza do floclador.

Por último, apresentamos as recomendações elencadas a seguir, na perspectiva de ampliar o presente estudo, tendo em vista principalmente a modelagem do sistema integrado floclador de placas – flotador por ar dissolvido.

- Recomenda-se estender o estudo do coeficiente de descarga para orifícios de diferentes diâmetros e geometrias possibilitando a avaliação de variadas condições hidráulicas que simulem a utilização dos orifícios em flocladores hidráulicos;
- Realizar estudos que possibilite a elaboração de uma modelagem hidráulica para o equipamento FFAD visando descrever os efeitos da aplicação de ar dissolvido no tamanho do jato e no gradiente de velocidade nas câmaras de floco-flotação;
- Desenvolver estudo para a verificação da eficiência do FFAD no tratamento de água para abastecimento humano oriundas de reservatórios que apresentem histórico de floração, de modo a verificar a remoção de cianobactérias e metabólitos em função dos parâmetros hidráulicos (gradiente de velocidade, taxa de recirculação, tempo de detenção hidráulico);
- Estudar o efeito do tamanho de bolhas no comportamento hidráulico do equipamento FFAD e na eficiência de tratamento;

REFERÊNCIAS

ALVES, C. **Tratamento de águas de abastecimento**. 3ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. ; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. **Manual de hidráulica**. 9º ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2005.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria nº 2.914/ 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Brasília, 2011.

CAMP, T. R. **Applied hydraulic desing of treatment plants**. In: **Seminar Papers on Waste-Water Treatment and Disposal** – Boston Society of Civil Engineers, Sanitary Section, Boston - Massachusetts, 1961.

CARISSIMI, E. **Reator gerador de flocos- RGF: concepção e desenvolvimento básico**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

CHAVES, K. O. **Desenvolvimento e aplicação de sistema de floco- flotação por ar dissolvido para tratamento de água de lavagem de filtro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª ed. São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 2005. 792 p. (Vol. I).

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento**. São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 2011. 454 p.

DI BERNARDO, L.; GIORGETTI, M.F. The use of perforated baffles at the inlet of settling basis. **Journal of the American Water Works Association**, v. 72, n. 9, p. 528-553, 1980.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Carlos: Editora LDIBE LTDA, 2008. 878 p. (Vol. I).

GEOCITIES. **Movimento Browniano**. Disponível

em:<<http://www.geocities.ws/saladefisica5/leituras/browniano.html>>. Acesso em: 25 de novembro de 2015.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3º ed. Campinas, São Paulo: Átomo, 2010. 494 p.

MORAES, P. B. **Coagulação e Floculação**. Disponível em:<http://webensino.unicamp.br/disciplinas/ST502293205/apoio/13/Coagula_o_e_Flocula_o.p_df>. Acesso em: 20 de novembro de 2015.

MOREIRA, P. **Tratamento de água para consumo humano**. Disponível em:<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgr0AA/tratamento-agua-consumo-humano-t-a-1-1>>. Acesso em: 20 de setembro de 2015.

MORUZZI, R. B., OLIVEIRA, S. C. de. **Modelagem matemática e análise do processo de floculação em câmaras em série**. In: 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications Serra Negra, SP - ISSN 2178-3667, p. 746-751, 2010.

MORUZZI, R. B., OLIVEIRA, A. L. de, DE JULIO, M. **Equipamento de monitoramento contínuo da floculação (EMCF): experimentação, correlação e calibração**. Revista DAE, São Paulo - ISSN 0101-6040, Volume 63, p. 25- 36, set. – dez., 2015.

NEVES, E. T. **Curso de Hidráulica**. 5º ed. Editora Globo: Porto Alegre, 1977.

OLIVEIRA, E. R. A. de. **Observações sobre o fitoplâncton de lagoas de estabilização e avaliação de remoção algal via flotação com ar dissolvido**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará

OLIVEIRA, D. S. de, TEIXEIRA, E. C. **Modelagem fluidodinâmica computacional aplicada ao projeto de unidades de floculação**. Anais do XXXII International Sodebras Congress. ISSN 1809-3957, Volume 10 - Nº 111, p. 121- 124, mar., 2015.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4º ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

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

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

SILVA, C.F.C. **Avaliação macro e microgeométrica de dispositivos utilizados na indústria do petróleo e gás**. 2007. Monografia (Curso de Engenharia de Petróleo e Metrologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- Rio Grande do Norte.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água.** 4^oed. Belo Horizonte: Imprimatur, 2002.

VIANNA, M. R., CASTRO, L. V. de. **Estudo hidráulico dos orifícios dos floculadores de bandejas perfuradas superpostas de estações de tratamento de água.** Construindo, Belo Horizonte, v. 6, n. 1, 39- 41 Jan/Jun. 2014.

VIANNA, M. R., CASTRO, L. V. de, RIBEIRO, C. de O. **Perforated Tray-Type Hydraulic Flocculator for Potable Water Treatment: Concept and State of the Art in Brazil.** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 5, Issue 3, March 2015)