



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ana Maria Beims Lopes

**DESENVOLVIMENTO DE NOVA CONCEPÇÃO AUTOLIMPANTE NA
CONFORMAÇÃO INTERNA DE DECANTADORES DE ALTA TAXA
DO TIPO TUBULAR HORIZONTAL**

FLORIANÓPOLIS

2020

Ana Maria Beims Lopes

**DESENVOLVIMENTO DE NOVA CONCEPÇÃO AUTOLIMPANTE NA
CONFORMAÇÃO INTERNA DE DECANTADORES DE ALTA TAXA DO TIPO
TUBULAR HORIZONTAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Ambiental

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Eliza Nagel Hassemer.

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Luiz Sens.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lopes, Ana Maria Beims

DESENVOLVIMENTO DE NOVA CONCEPÇÃO AUTOLIMPANTE NA CONFORMAÇÃO INTERNA DE DECANTADORES DE ALTA TAXA DO TIPO TUBULAR HORIZONTAL / Ana Maria Beims Lopes; orientadora, Prof^a. Dr^a. Maria Eliza Nagel Hassemer, coorientador, Prof. Dr. Maurício Luiz Sens, 2020.

240 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Tratamento de água. 2. Decantador de alta taxa. 3. Concepção de decantador. 4. Fluxo laminar. 5. Dutos horizontais. I. Nagel, Maria Eliza Hassemer. II. Sens, Maurício Luiz. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Ana Maria Beims Lopes

**Desenvolvimento de Nova Concepção Autolimpante na Conformação Interna de
Decantadores de Alta Taxa do Tipo Tubular Horizontal**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Bruno Segalla Pizzolatti.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Sidney Seckler Ferreira Filho.
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Prof^ª. Dr^ª. Maria Eliza Nagel Hassemer.
Coordenadora do Programa

Prof^ª. Dr^ª. Maria Eliza Nagel Hassemer.
Orientadora

Prof. Dr. Maurício Luiz Sens.
Coorientador

Florianópolis, 25 de março de 2020.

AGRADECIMENTOS

Com todo meu carinho, agradeço...

Primeiramente a Deus, pela vida, pela presença suave, amorosa e consoladora, em todos os dias de minha existência.

Especialmente ao meu pai, Adilson, a minha mãe, Izabel, e a minha irmã, Júlia! Pai, obrigada pelos almoços, conversas e caminhadas na UFSC. Mãe e Ju, obrigada por fazerem e levarem comidinhas para mim na reta final, e por sempre estarem por perto dando todo apoio. Obrigada pelos abraços amorosos de vocês três, que tanto me fortaleceram.

A toda minha Família, obrigada pelo suporte e assistência carinhosa, pelos momentos de paz, descontração e amor.

A minha orientadora, professora Maria Eliza Nagel, obrigada pelo auxílio, pelas palavras de incentivo e positividade!

Ao meu coorientador, professor Maurício Luiz Sens, idealizador deste decantador, a quem eu devo muito!... Por me aturar, incentivar e ajudar muito nos momentos fáceis e difíceis.

Ao professor Bruno, pela presença, questionamentos, ideias e auxílio, sempre prestativo. Ao professor Ramon, por me ouvir e ajudar com ideias. E ao professor Sidney, por aceitar ser da minha banca. Agradeço por todas as colaborações de vocês para aprimorar este trabalho.

Ao Augusto, que tanto me ajudou, seja nos experimentos do laboratório, seja analisando que nem loucos (Nazaré) as fórmulas contidas nos desenhos, seja revisando tudo... Não poderia deixar de agradecer pelo famoso “901!” que realmente me incentivava, e pelos ataques de riso até chorar.

Aos queridos bolsistas Pedro e Deborah, meu sincero obrigada! Grata por toparem tudo sempre de bom humor, com bom ânimo! E Pedro, obrigada pelas tardes de trabalhos desmagnetizadores no lab!

Ao Augusto e Pedro, obrigada pelas ideias e animação na montagem do sistema piloto, era muito legal aprender com vocês! Bruno e prof. Maurício, também sempre com muitas ideias para o trabalho.

Aos colegas do LAPOÁ, Thyara, Fernando, Sérgio, Lorena, Tiago e Ailton, agradeço pelo companheirismo, regado de risadas, cafezinho e bolachas gostosas.

Ao Guizinho, meu amigo do coração, obrigada por partilhar tantos momentos de verdadeira amizade, seja comendo um bolinho do Paulo, seja falando dos planos da vida, seja

se confortando nas dificuldades. Obrigada pela prestatividade, paciência, e por sempre me ajudar, principalmente com seu conhecimento estatístico.

A todos os “Amigos do Fido”, que me fizeram rir nos momentos mais tensos, sempre me deram suporte e seu amor.

Ao Pablo, aos meus irmãos da Associação Espírita Fé e Caridade e aos amigos da capoeira, que me ajudaram a estar melhor mental, espiritual e fisicamente para enfrentar essa jornada.

Ao Laboratório Integrado do Meio Ambiente, pela disponibilidade e suporte.

A bolsa da CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil– Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por me acolher e possibilitar essa oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

Uma etapa importante no tratamento físico-químico de água e efluentes é a decantação – ou sedimentação – responsável pela remoção de partículas em suspensão do meio líquido. Os decantadores de alta taxa são amplamente empregados atualmente, devido a maior eficiência por área em planta do que o tipo convencional. Dentre esses, os decantadores tubulares horizontais são teoricamente os mais eficientes em remoção de sólidos, em consequência do ângulo de posicionamento dos elementos de sedimentação em relação à horizontal (0°). Todavia, esses perderam espaço para os decantadores de alta taxa com placas ou dutos inclinados (geralmente a 60°), cuja configuração permite a autolimpeza, tornando-se os mais aplicados hoje em dia. Assim, o principal motivo de desuso da decantação tubular horizontal foi a ausência do fator autolimpante. Nesse ínterim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver e avaliar uma concepção autolimpante na conformação interna de decantadores de alta taxa do tipo tubular horizontal, por meio da disposição de uma abertura longitudinal inferior nos dutos de sedimentação. Os objetivos específicos incluíram: analisar a influência da geometria da seção transversal dos dutos no desempenho e autolimpeza do decantador; avaliar o desempenho e autolimpeza de um possível arranjo de dutos; e realizar a extrapolação dessa conformação interna para escala real. Para isso, foi construído em escala piloto um decantador em acrílico, com cinco dutos horizontais na zona de sedimentação, de diferentes tamanhos e formatos de seção (circular e losangular). Além disso, uma segunda unidade piloto em acrílico foi construída com um possível arranjo de dutos. Optou-se realizar o tratamento de uma água bruta sintética, de turbidez igual a 100 uT e cor verdadeira 75 uH. Comprovou-se, com 99% de confiança, que, dentre os dutos testados, seções transversais com distâncias verticais menores e o uso do formato losangular contribuem para elevação significativa da eficiência do decantador. Também que a taxa de escoamento superficial máxima admissível foi superior em dutos de menores seções transversais e não variou estatisticamente entre os dois formatos de seção testados. Constatou-se que o formato losangular visualmente oferece maior capacidade de autolimpeza que o circular para o duto de sedimentação, sendo o mais indicado. Quanto ao arranjo de dutos, a eficiência média em remoção de turbidez foi de $95,2\% \pm 0,4\%$, mantendo-se 100% do tempo com turbidez da água decantada inferior a 4 uT. Tal arranjo permitiu que os flocos transitassem entre os perfis e sedimentassem até a zona de lodo, sem adentrar na abertura longitudinal inferior dos demais dutos, ou seja, uma autolimpeza adequada. Em relação à extrapolação para escala real, notou-se o potencial desta inovação, tanto para a redução do tamanho da unidade de decantação nas estações de tratamento (com área superficial até 3,3 vezes menor, para o exemplo efetuado), quanto para a aplicação de taxas de escoamento superficial superiores às existentes, atingindo valores pelo menos duas vezes maior que a literatura, de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Os resultados de eficiência, taxa de escoamento superficial extrapolada e autolimpeza mostraram que decantador tubular horizontal com a nova concepção autolimpante, denominado de *MLSens*, tem potencial para ser mais eficaz em produtividade e eficiência do que decantadores de alta taxa empregados atualmente. Assim, a concepção desenvolvida contribui para evolução histórica dos decantadores de alta taxa.

Palavras-chave: Tratamento de água. Decantação de alta taxa. Decantador tubular horizontal. Dutos posicionados na horizontal. Autolimpeza. Abertura longitudinal inferior.

ABSTRACT

An important step in the physical-chemical treatment of water and effluents is settling - or sedimentation, which is responsible for removing suspended particles from the liquid medium. High-rate sedimentation are widely used today due to greater efficiency per plant area. Horizontal tubular settler are theoretically the most efficient high-rate settlers in removing suspended solids, as a result of the positioning angle of the sedimentation elements in relation to the horizontal (0°). However, these lost place for high-rate settlers with steeply inclined tubes or plates (usually at 60°), whose self-cleaning advantage has made this layout the most applied today. Therefore, the main reason for disuse of horizontal tubular settler was not to have this self-cleaning factor. Thereby, the objective of the present work was to develop and evaluate a self-cleaning concept in the internal conformation of high-rate horizontal tubular settlers, through the provision of a lower longitudinal opening in the sedimentation ducts. Specific objectives included analyzing the influence of the geometry of the duct section on the settler's performance and self-cleaning; evaluate the performance and self-cleaning of a possible ducts arrangement; and extrapolate this internal conformation to full scale. For this, an acrylic settler was built on a pilot scale, with five horizontal ducts in the sedimentation zone, of different sizes and section shapes (circular and diamond-shaped). In addition, a second acrylic pilot unit was built with a possible arrangement of ducts. It was decided to carry out the treatment of a synthetic raw water, with turbidity equal to 100 NTU and true color 75 uH. It was proven, with 99% confidence, that, of among tested pipes, smaller cross-section sizes and the use of the diamond shape contribute to a significant increase in the efficiency of the decanter. Also, the maximum allowable surface overflow rate was higher in ducts with smaller cross sections and did not vary statistically between the two section formats tested. It was found that the diamond shape visually offers greater self-cleaning capacity for the sedimentation duct, being the most suitable. As for the pipeline arrangement, the average efficiency in removing turbidity was $95.2 \pm 0,4\%$, maintaining 100% of the time with turbidity of the decanted water below 4 NTU. Such an arrangement allowed the particles to pass between the profiles and settle to the sludge area, without entering the lower opening of another duct, that is, proper self-cleaning. In relation to extrapolation to real scale, the potential of this innovation was noted both for reducing the size-settling unit in the treatment plants and for the surfaces overflow rates application higher than the existing ones in the literature. For the example carried out, the surface sedimentation area was 3.3 times smaller than current settler, and reaching rate values at least twice as high, of $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. The results of efficiency, extrapolated surface overflow rate and self-cleaning showed that the new horizontal duct settler with self-cleaning design, named as *MLSens*, has the potential to be more effective in productivity and efficiency than current high-rate settlers do. Thereafter, the developed invention can contribute to the historical evolution of high-rate sedimentation.

Keywords: Water treatment. High-rate sedimentation. Horizontal tubular settler. Essentially horizontal tube settlers. Self-cleaning. Lower longitudinal opening.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática característica do tratamento de água do tipo convencional.....	29
Figura 2 – Classificação e distribuição das partículas em função do tamanho.	30
Figura 3 – Relação entre o tipo de sedimentação, concentração e natureza flocculentas das partículas.	35
Figura 4 – Partículas discretas de diferentes tamanhos que entram na posição mais desfavorável para serem removidas, com foco à trajetória da partícula com velocidade de sedimentação crítica.....	36
Figura 5 – Esquema de corte longitudinal de decantador horizontal ideal.	38
Figura 6 – Tipo de correntes de água formadas em decantadores reais.	39
Figura 7 – Tipos de decantador de acordo com a direção do fluxo de escoamento.	40
Figura 8 – Diferentes tipos de decantadores de acordo com a operação ou funcionamento.	41
Figura 9 – Decantador convencional de escoamento horizontal.....	42
Figura 10 – Demonstração da redução da área superficial pelo aumento da área de contato para os flocos sedimentarem com o uso de placas planas paralelas inclinadas em decantadores.....	45
Figura 11 – Fluxos aplicados em decantadores com placas planas paralelas na zona de sedimentação.	46
Figura 12 – Parâmetros das placas ou módulos relevantes na eficiência de um decantador.....	47
Figura 13 – Relação do ângulo de inclinação da placa ou duto e a eficiência de sedimentação.....	48
Figura 14 – Relação do comprimento relativo e a eficiência de sedimentação.....	49
Figura 15 – Decantador de alta taxa com placas planas paralelas inclinadas.	50
Figura 16 – Vários formatos de dutos e tipos de módulos tubulares.	51
Figura 17 – Comprimento necessário de sedimentação em função da posição da partícula na entrada do duto, para $v_0 = 25$ cm/min.....	52
Figura 18 – Comparação das trajetórias das partículas em posição mais crítica no interior de módulos de sedimentação inclinados (a) e horizontais (b).....	54
Figura 19 – Redução da área superficial pelo aumento da área de contato para os flocos sedimentarem com o uso de módulos na horizontal.	55
Figura 20 – Lavagem de decantador convencional horizontal.....	57
Figura 21 – Decantador de bandejas ou fundo múltiplo de dois andares.....	59
Figura 22 – Decantador de bandejas ou fundo múltiplo de três andares.....	59
Figura 23 – Decantador tubular essencialmente horizontal.	61
Figura 24 – Desenho esquemático do sistema piloto usado para avaliar o efeito do diâmetro e comprimento do tubo no decantador tubular horizontal (vista em planta).....	62
Figura 25 – Gráficos demonstrando o efeito da taxa superficial, dosagem de polieletrólito, turbidez afluente e comprimento e diâmetro do tubo na eficiência da decantação.....	63
Figura 26 – Desenho esquemático do piloto para avaliar os efeitos da inclinação dos tubos.	65
Figura 27 – Decantador tubular inclinado.....	65
Figura 28 – Módulos com tubos quadrados, de inclinação íngreme (Neptune Microfloc).....	66
Figura 29 – Duto de sedimentação autolimpante.	69
Figura 30 – Representação gráfica do sistema piloto como um todo.....	72
Figura 31 – Desenho esquemático das unidades e funcionamento do sistema piloto.	73
Figura 32 – Fluxograma da metodologia com o ordenamento dos estudos investigativos de acordo com os objetivos do trabalho.....	75
Figura 33 – Equipamento Jartest (com reatores em descontínuo) utilizado nesta pesquisa.....	81
Figura 34 – Desenho esquemático e foto do misturador rápido do tipo hidráulico em linha.....	83
Figura 35 – Trechos em série do floculador tubular helicoidal.....	85
Figura 36 – Desenho com as medidas dos dutos horizontais do Decantador 1.....	86
Figura 37 – Desenho esquemático da unidade piloto Decantador 1.	87
Figura 38 – Entrada e saída dos dutos da unidade de Decantação 1.....	87
Figura 39 – Fluxograma do dimensionamento do Decantador 1 e 2.	88
Figura 40 – Corte do decantador 1, mostrando a detalhes da conformação interna, largura e altura.....	90

Figura 41 – Detalhe do dreno de descarga de lodo.....	91
Figura 42 – Representação da seção dos dutos losangulares do Decantador 1 e 2, mostrando ângulos internos, ângulo formado com o eixo horizontal e diagonal vertical percorrida pelos flocos.	93
Figura 43 – Desenho esquemático do Decantador 2 (com corte na lateral).....	93
Figura 44 – Unidade em escala piloto de Decantação 2.	94
Figura 45 – Esquema dos pontos de coleta de amostra da água ao longo dos experimentos de decantação. 95	
Figura 46 – Coleta da água floculada com auxílio de seringa, em frente à entrada do duto de sedimentação.	96
Figura 47 – Componentes do Decantador 1, relacionados a operação.	98
Figura 48 – Sequência metodológica para operação do Decantador 1 na Etapa 2, Fase I.	102
Figura 49 – Dutos utilizados para extrapolação do decantador MLSens.....	109
Figura 50 – Planta, vista e corte do Decantador 1.	114
Figura 51 – Tê perfurado para distribuição de água floculada.	115
Figura 52 – Tubulação perfurada (manifold) para distribuição de água floculada.	115
Figura 53 – Planta, vista e corte do Decantador 2.	116
Figura 54 – Tubulação perfurada para distribuição de água floculada.	117
Figura 55 – Diagrama de caixas da velocidade de escoamento longitudinal em cada duto de sedimentação.	119
Figura 56 – Diagrama de dispersão da turbidez da água bruta, floculada e decantada por amostra coletada ao longo das operações.	121
Figura 57 – Diagrama de dispersão da cor aparente da água bruta, floculada e decantada por.....	121
Figura 58 – Diagrama de dispersão das amostras de turbidez da água floculada ao longo das operações. .	123
Figura 59 – Gráfico da turbidez média diária da água floculada operação, para cada duto.	124
Figura 60 – Gráfico da turbidez média diária da água decantada operação, para cada duto.	125
Figura 61 – Gráfico da eficiência média de remoção de turbidez operação, para cada duto.	126
Figura 62 – Gráfico da eficiência média de remoção de cor aparente por dia de operação, para cada duto.	127
Figura 63 – Distribuição dos dados de água floculada em relação à curva de distribuição teórica Normal.	127
Figura 64 – Histograma de frequência das amostras de turbidez de água floculada.	128
Figura 65 – Diagrama de caixas da turbidez da água floculada por duto.	129
Figura 66 – Diagrama de caixas da cor aparente da água floculada por duto.....	130
Figura 67 – Distribuição dos dados de água decantada em relação à distribuição teórica Lognormal.	130
Figura 68 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada no Decantador 1, na Etapa 1.....	131
Figura 69 – Diagrama de caixas da turbidez da água decantada por duto.	132
Figura 70 – Diagrama de caixas da cor parente da água decantada por duto.	134
Figura 71 – Histograma de frequência da eficiência do Decantador 1 em remoção de turbidez.	135
Figura 72 – Histograma de frequência da eficiência do Decantador 1 em remoção de cor aparente.	135
Figura 73 – Diagrama de caixas da porcentagem de turbidez remanescente na água decantada por duto. .	138
Figura 74 – Diagrama de caixas da eficiência do Decantador 1 em remoção de turbidez por duto.	138
Figura 75 – Diagrama de caixas da porcentagem de cor parente remanescente na água decantada por duto.	140
Figura 76 – Diagrama de caixas da eficiência do decantador em remoção de cor parente por duto.	141
Figura 77 – Distribuição dos dados taxa em relação à distribuição teórica Lognormal.	147
Figura 78 – Diagrama de caixas da taxa de escoamento superficial por duto.	147
Figura 79 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada pelo Decantador 1, na Etapa 2.....	151
Figura 80 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de turbidez pelo Decantador 1, na Etapa 2.	151
Figura 81 – Diagrama de dispersão da taxa de escoamento superficial em relação à eficiência de remoção de turbidez, para cada duto, agrupando-os de forma a comparar o tamanho e formato da seção.....	152

Figura 82 – Imagem aproximada de um duto circular, para mostrar o comportamento típico dos flocos ao saírem através da abertura longitudinal inferior nas Etapas 1 e 2.....	154
Figura 83 – Comportamento típico dos flocos ao saírem através da abertura longitudinal inferior dos dutos horizontais na Etapa 3.....	155
Figura 84 – Camada de lodo sobre os dutos de sedimentação, na parte externa.....	156
Figura 85 – Depósito de lodo nos dutos circulares, com volume considerável de lodo no fundo.	157
Figura 86 – Depósito de lodo nos dutos losangulares com formações esparsas ao longo do comprimento.	157
Figura 87 – Vista lateral do Decantador 1, com enfoque para o acúmulo de lodo no Duto 1.	158
Figura 88 – Fechamento da abertura longitudinal inferior decorrente da deformação nos dutos circulares.	159
Figura 89 – Duto com abertura inferior próximo de fechar (esquerda) e duto com espaçadores (direita)..	159
Figura 90 – Acúmulo de lodo nos dutos 1, 3 e 5, e obstrução da abertura longitudinal inferior no 1 e no 3.	160
Figura 91 – Influência da largura da abertura longitudinal inferior no acúmulo de lodo.	162
Figura 92 – Duto com abertura inferior próximo de fechar (esquerda) e duto com espaçadores (direita)..	162
Figura 93 – Entrada e saída de um duto horizontal de sedimentação do tipo MLSens.....	165
Figura 94 – Zona de lodo do Decantador 1, salientando o monte formado abaixo de cada duto.....	167
Figura 95 – Vista lateral do Decantador 1, com o acúmulo de lodo concentrado no início do comprimento.	167
Figura 96 – Diagrama de dispersão da turbidez da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo.	171
Figura 97 – Diagrama de dispersão da cor aparente da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo.	171
Figura 98 –Diagrama de caixas da turbidez da água bruta, floculada e decantada.	172
Figura 99 – Diagrama de caixas da turbidez da água floculada ao longo do tempo.	173
Figura 100 – Diagrama de caixas da turbidez da água decantada ao longo do tempo.	174
Figura 101 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada do Decantador 2.....	175
Figura 102 – Distribuição dos dados de eficiência de remoção de turbidez em relação à curva de distribuição teórica Lognormal.	175
Figura 103 – Diagrama de dispersão da eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo.	176
Figura 104 – Diagrama de caixas da eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo.....	176
Figura 105 – Diagrama de dispersão da eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo.	177
Figura 106 – Diagrama de caixas da eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo.	178
Figura 107 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de turbidez do Decantador 2.	179
Figura 108 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de cor aparente do Decantador 2.....	179
Figura 109 – Comportamento dos flocos ao saírem dos dutos do arranjo.	180
Figura 110 – Camada de lodo fina externamente aos dutos horizontais.	181
Figura 111 – Vista em planta do arranjo de dutos, com acúmulo de lodo em diferentes intervalos.	181
Figura 112 – Vista lateral do arranjo de dutos, com acúmulos pontuais no fundo dos dutos.	182
Figura 113 – Vista geral do Decantador 2, mostrando o acúmulo na zona de lodo no início do comprimento.	184
Figura 114 – Planta extrapolação Decantador 1.	189
Figura 115 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 1.....	189
Figura 116 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 2.....	190
Figura 117 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 3.....	190
Figura 118 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 4.....	191
Figura 119 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 5.....	191
Figura 120 – Planta extrapolação Decantador 2.	192
Figura 121 – Corte extrapolação Decantador 2.....	192

Figura 122 – Relação dos parâmetros de decantação com o aumento do número de colunas (nc) e número de linhas (nl) de um arranjo de dutos da conformação interna de um decantador tubular horizontal.	194
Figura 123 – Parâmetros de dimensionamento inerentes ao layout do arranjo de dutos losangulares.	195
Figura 124 – Desenho explicativo para o acréscimo de largura a partir da formatação dos dutos losangulares em blocos.	197
Figura 125 – Parâmetros de dimensionamento inerentes ao layout do arranjo de dutos circulares.	198
Figura 126 – Desenho explicativo para o acréscimo de largura a partir da formatação dos dutos circulares em blocos.	200
Figura 127 – Configuração de uma unidade de decantação MLSens para este exemplo de dimensionamento.	201
Figura 128 – Extrapolação dos módulos de sedimentação do tipo MLSens para tratar com mesma altura do decantador e área superficial de sedimentação.	204
Figura 129 – Extrapolação dos módulos de sedimentação do tipo MLSens para apresentar com mesma altura e vazão nominal do decantador.	210

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de valores do gradiente médio de velocidade para flocladores, recomendada na literatura.	32
Tabela 2 – Valores testados para as diferentes condições experimentais.	62
Tabela 3 – Características da água bruta sintética.	76
Tabela 4 – Especificações do coagulante Policloreto de Alumínio (PAC).	79
Tabela 5 – Parâmetros dos trechos em série do floclador tubular helicoidal.	84
Tabela 6 – Características dos dutos horizontais de sedimentação do Decantador 1.	86
Tabela 7 – Parâmetros adotados para o extrapolarmento das unidades piloto.	108
Tabela 8 – Distância vertical de cada duto, de acordo com sua geometria, e comprimento necessário para o floco ser removido em cada duto do Decantador 1, para um $L_r = 26,6$	112
Tabela 9 – Comprimento relativo recalculado, considerando as distâncias verticais e longitudinais que o floco deve percorrer em cada duto para ser removido e a velocidade longitudinal que poderia ser atingida a partir desses L_r	113
Tabela 10 – Área e vazão individual dos dutos do Decantador 1, para velocidade de escoamento longitudinal nos dutos igual a 38,5 cm/min.	114
Tabela 11 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase I, Etapa 1.	118
Tabela 12 – Quantidade total de amostras de turbidez da água decantada por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram inferiores à turbidez de 4,0 uT e 2,0 uT.	131
Tabela 13 – Quantidade total de amostras de eficiência de remoção de turbidez por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram superiores às eficiências de 85%, 90% e 95%.	136
Tabela 14 – Quantidade total de amostras de eficiência de remoção de cor aparente por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram superiores às eficiências de 85%, 90% e 95%.	137
Tabela 15 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez.	142
Tabela 16 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre os dutos de diferentes tamanhos, para $\alpha=1\%$	142
Tabela 17 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre os dutos de diferentes formatos, para $\alpha=1\%$	143
Tabela 18 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de cor aparente entre os dutos, para $\alpha=1\%$	144
Tabela 19 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre o grupo inicial e final das operações, para $\alpha=1\%$	144
Tabela 20 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez das operações iniciais.	145
Tabela 21 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de turbidez entre os dutos, durante as operações iniciais, para $\alpha=1\%$	145
Tabela 22 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez das operações finais.	145
Tabela 23 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de turbidez entre os dutos das operações finais, para $\alpha=1\%$	146
Tabela 24 – Ranqueamento da taxa de escoamento superficial máxima admitida em cada duto.	148
Tabela 25 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da taxa de escoamento superficial máxima (q) entre os dutos de diferentes tamanhos, para $\alpha=1\%$	148
Tabela 26 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da taxa de escoamento superficial máxima (q) entre os dutos de diferentes formatos, para $\alpha=1\%$	149
Tabela 27 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase I, Etapa 2.	150
Tabela 28 – Coeficiente de correlação entre as variáveis apresentadas para Etapa 2 do Decantador 1.	153

Tabela 29 – Relação entre tamanho dos dutos do Decantador 1 e larguras das respectiva aberturas inferiores.....	163
Tabela 30 – Número de Reynolds nos dutos do decantador 1, bem como o perímetro e raio hidráulico, referentes a cálculos intermediários.....	164
Tabela 31 – Taxa de escoamento superficial possível a partir do alcance de lodo nos dutos na Etapa 1....	166
Tabela 32 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase II, Etapa 1.....	168
Tabela 33 – Relação entre tamanho da seção dos dutos do Decantador 2 e largura da abertura inferior.	183
Tabela 34 – Distância média do alcance máximo de lodo no interior de cada duto do arranjo, bem como o resultado médio do acúmulo por linha e coluna.	185
Tabela 35 – Dimensões do Decantador 1 extrapoladas da escala piloto para tratar com taxa de escoamento superficial de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, mantendo o comprimento dos dutos igual a escala piloto, de 1,44 m.	188
Tabela 36 – Dimensões do Decantador 2 extrapoladas da escala piloto para taxa de escoamento superficial de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ e com comprimento dos dutos de 0,90 m.	188
Tabela 37 – Parâmetros referentes ao decantador existente, de alta taxa com placas paralelas inclinadas.	201
Tabela 38 – Dados de entrada para o cálculo de extrapolação do decantador proposto.....	202
Tabela 39 – Parâmetros calculados para a extrapolação do decantador <i>MLSens</i> , fixando a área superficial de sedimentação e a altura iguais do decantador de alta taxa com placas inclinadas.....	203
Tabela 40 – Comparativo dos principais parâmetros entre o decantador de alta taxa com placas inclinadas e o decantador tipo <i>MLSens</i> , ambos com mesma área superficial de sedimentação = $71,5 \text{ m}^2$	206
Tabela 41 – Parâmetros calculados para a extrapolação do decantador <i>MLSens</i> , fixando a vazão nominal e a altura iguais do decantador de alta taxa com placas inclinadas.	209
Tabela 42 – Comparativo dos principais parâmetros entre o decantador de alta taxa com placas inclinadas e o decantador tipo <i>MLSens</i> , ambos com mesma vazão do decantador = 125 L/s	211
Tabela 43 – Valores dos parâmetros aplicados.....	235

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros, método analítico e equipamentos utilizados para análises físico-químicas.....	95
Quadro 2 – Par comparado no Teste de Hipóteses teste, para verificar a influência do formato da seção na eficiência, bem como o motivo de comparação.	101
Quadro 3 – Descrição dos pares comparados no Teste de Hipóteses para verificar a influência do tamanho da seção na eficiência, assim como o motivo de comparação.	101
Quadro 4 – Critérios adotados para avaliar a capacidade de autolimpeza dos dutos de sedimentação.....	105
Quadro 5 – Valores de turbidez em águas sintéticas preparadas em outros estudos.....	231

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	– Óxido de Alumínio, ou alumina, ou alumínio ativo
$Al(OH)_3$	– Hidróxido de Alumínio
A_i	– área molhada da seção do duto
A_{sed}	– área superficial de sedimentação
AWWA	– <i>American Water Works Association</i>
α	– nível de significância do teste de hipóteses
C	– Concentração de determinada substância em uma solução
cm	– centímetro
e	– espessura da parede do duto
ENS	– Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
ETA	– Estação de Tratamento de Água
ETE	– Estação de Tratamento de Esgoto
d	– dia
dh_L	– distância horizontal percorrida pelo floco no eixo longitudinal do duto
dh	– distância horizontal da seção duto
dv_T	– distância vertical percorrida pelo floco no eixo transversal do duto
dv	– distância vertical da seção duto
g	– grama
G_{MR}	– Gradiente de velocidade da mistura rápida
G_f	– Gradiente de velocidade da floculação
h	– hora
H_{sed}	– profundidade da zona de sedimentação
H_T	– profundidade total do decantador
kg	– quilograma
L	– litro
l	– comprimento da placa ou do duto de sedimentação
L_r	– comprimento relativo
L_{sed}	– largura da zona de sedimentação
L_T	– largura total do decantador
LAPOÁ	– Laboratório de Potabilização das Águas
LIMA	– Laboratório Integrado do Meio Ambiente
mm	– milímetro
m^2	– metro quadrado
m^3	– metro cúbico
mL	– mililitro
n	– Coeficiente de rugosidade Manning
MS	– Ministério da Saúde

MR	– misturador Rápido
μ	– média do conjunto amostral
μE	– média do conjunto amostral de eficiência
μq	– média do conjunto amostral de taxa de escoamento superficial
n	– número de dados válidos do conjunto amostral
nc	– número de dutos justapostos em colunas
nl	– número de dutos sobrepostos em linhas
NBR	– Norma Brasileira
N_R	– número de Reynolds
PAC	– Policloreto de Alumínio ou Hidróxicloreto de alumínio
pH	– potencial hidrogeniônico
$\pi \cdot r^2$	– área do círculo, produto entre número Pi e raio ao quadrado
Q	– vazão
Q_i	– vazão individual do duto de sedimentação
Q_{dec}	– vazão do decantador
q	– taxa de escoamento superficial
Rh	– raio hidráulico da seção molhada
rpm	– rotações por minuto
s	– segundos
s^2	– variância de uma amostra de um conjunto amostral
T (°C)	– temperatura em graus Celsius
T_{MR}	– tempo de detenção médio da mistura rápida
T_f	– tempo de detenção médio da floculação
t_{obs}	– medida estatística dos dados observados na distribuição t-Student
θ	– ângulo de inclinação formado com a horizontal
UFSC	– Universidade Federal de Santa Catarina
uH	– unidades Hazen
uT	– unidades de Turbidez
V	– volume
vsc	– velocidade de sedimentação crítica
vs	– velocidade de sedimentação
v_0	– velocidade longitudinal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	23
2	OBJETIVOS	27
2.1	OBJETIVO GERAL	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1	COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO	29
3.2	PRODUTOS QUÍMICOS APLICADOS NA COAGULAÇÃO	32
3.3	PRINCÍPIOS DA DECANTAÇÃO	33
3.4	PRINCIPAIS TIPOS DE DECANTADORES	39
3.4.1	Decantador Convencional Horizontal.....	42
3.4.2	Decantador de Alta Taxa	44
3.4.2.1	<i>Decantador tubular horizontal (0°) x decantador com placas ou módulos tubulares inclinados entre 55° e 65°</i>	53
3.5	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS DECANTADORES NO TRATAMENTO DE ÁGUA	56
3.5.1	Nova Concepção da Conformação Interna de Decantador de Alta Taxa	68
4	METODOLOGIA.....	71
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	71
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PILOTO	76
4.2.1	Água de Estudo	76
4.2.1.1	<i>Determinação de parâmetros de qualidade da água bruta sintética.....</i>	76
4.2.1.2	<i>Matérias-primas da água bruta sintética</i>	77
4.2.1.3	<i>Modo de preparo da água bruta sintética</i>	77
4.2.2	Ensaio de Tratabilidade em Reatores em Descontínuo.....	78
4.2.2.1	<i>Produtos químicos aplicados</i>	78
4.2.2.2	<i>Procedimentos do ensaio de tratabilidade.....</i>	80
4.2.3	Descrição do Sistema Piloto	82
4.2.3.1	<i>Misturador rápido e floculador</i>	82
4.2.3.2	<i>Decantador 1</i>	85
4.2.3.2.1	Dimensionamento	88
4.2.3.3	<i>Decantador 2</i>	92
4.2.3.3.1	Dimensionamento	94
4.3	PARÂMETROS DE CONTROLE.....	94

4.4	PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO DE TESTE DE HIPÓTESE DE MÉDIA	96
4.5	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS (FASE I – ETAPA 1).....	98
4.5.1	Operação do Sistema Piloto.....	98
4.5.2	Análise Descritiva e Inferência Estatística.....	100
4.6	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA TAXA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL MÁXIMA ADMISSÍVEL (FASE I – ETAPA 2) 102	
4.6.1	Operação do Sistema Piloto.....	102
4.6.2	Análise Descritiva e Inferência Estatística.....	103
4.7	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA (FASE I – ETAPA 1,2 E 3).....	104
4.7.1	Operação do Sistema Piloto.....	104
4.7.2	Análise Descritiva.....	105
4.8	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1)106	
4.8.1	Operação do Sistema Piloto.....	106
4.8.2	Análise Estatística Descritiva.....	106
4.9	AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1 E 2)	107
4.9.1	Operação do Sistema Piloto.....	107
4.9.2	Análise Descritiva.....	107
4.10	EXTRAPOLAÇÃO PARA ESCALA REAL	107
4.10.1	Mantendo Área Superficial de Sedimentação dos Decantadores em Escala Piloto	108
4.10.2	Adotando Medidas Próximas aos Decantadores em Escala Real	108
5	RESULTADOS	111
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A COGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	111
5.2	DESENVOLVIMENTO DO DECANTADOR <i>MLSens</i>	112
5.2.1	Decantador em Escala Piloto 1.....	112
5.2.2	Decantador em Escala Piloto 2.....	116
5.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS (FASE I – ETAPA 1).....	117
5.3.1	Análise Estatística Descritiva	117
5.3.1.1	<i>Análise descritiva geral</i>	<i>117</i>
5.3.1.2	<i>Variabilidade temporal.....</i>	<i>120</i>
5.3.1.3	<i>Análise da distribuição dos dados.....</i>	<i>127</i>
5.3.2	Inferência Estatística: Teste de Hipóteses de Médias	141
5.3.2.1	<i>Teste de hipóteses observando a diferença temporal presente na Etapa 1.....</i>	<i>144</i>

5.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA TAXA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL MÁXIMA ADMISSÍVEL (FASE I – ETAPA 2)	146
5.4.1	Análise Estatística Descritiva.....	146
5.4.2	Inferência Estatística: Teste de Hipóteses de Médias.....	148
5.4.3	Relação entre Taxa e Eficiência.....	150
5.5	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA (FASE I – ETAPA 1, 2 E 3)	154
5.5.1	Análise dos Critérios de Autolimpeza	154
5.5.1.1	<i>Critérios 1 e 2 – retorno de flocos pela abertura longitudinal inferior.....</i>	<i>154</i>
5.5.1.2	<i>Critério 3 – Formação de camada de lodo revestindo superfície dos dutos</i>	<i>155</i>
5.5.1.3	<i>Critério 4 – Acúmulo de lodo no fundo dos dutos</i>	<i>156</i>
5.5.1.4	<i>Critério 5 – Obstrução da seção transversal</i>	<i>157</i>
5.5.1.5	<i>Critério 6 – Obstrução da abertura longitudinal inferior</i>	<i>158</i>
5.5.1.6	<i>Critério 7 – Ocorrência de ressuspensão de flocos.....</i>	<i>160</i>
5.5.1.7	<i>Critério 8 – Facilidade de deslizamento dos flocos.....</i>	<i>161</i>
5.5.1.8	<i>Critério 9 – Relação entre tamanhos da seção e da abertura inferior.....</i>	<i>163</i>
5.5.1.9	<i>Critério 10 – Regime de escoamento</i>	<i>164</i>
5.5.1.10	<i>Considerações sobre a capacidade de autolimpeza</i>	<i>165</i>
5.5.2	Distância Máxima Alcançada pelos Flocos nos Dutos.....	165
5.6	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1)	168
5.6.1	Análise Estatística Descritiva.....	168
5.6.1.1	<i>Análise descritiva geral.....</i>	<i>168</i>
5.6.1.2	<i>Variabilidade temporal</i>	<i>170</i>
5.6.1.3	<i>Análise da distribuição dos dados</i>	<i>178</i>
5.7	AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1 E 2)	180
5.7.1	Análise dos Critérios de Autolimpeza	180
5.7.1.1	<i>Critérios 1 e 2 – Retorno de flocos pela abertura longitudinal inferior</i>	<i>180</i>
5.7.1.2	<i>Critério 3 – Formação de camada de lodo revestindo a superfície externa dos dutos.....</i>	<i>181</i>
5.7.1.3	<i>Critério 4 – Acúmulo de lodo no fundo dos dutos</i>	<i>181</i>
5.7.1.4	<i>Critérios 5 e 6 – Obstrução da seção transversal e da abertura longitudinal inferior dos dutos</i>	<i>182</i>
5.7.1.5	<i>Critério 7 – Ocorrência de ressuspensão de flocos.....</i>	<i>182</i>
5.7.1.6	<i>Critério 8 – Facilidade de deslizamento dos flocos.....</i>	<i>182</i>
5.7.1.7	<i>Critério 9 – Relação entre tamanhos da seção e da abertura inferior.....</i>	<i>183</i>
5.7.1.8	<i>Critério 10 – Regime de escoamento</i>	<i>183</i>

5.7.1.9	<i>Critério 11 – Sedimentação entre os perfis de dutos do arranjo</i>	184
5.7.1.10	<i>Considerações sobre a capacidade de autolimpeza</i>	184
5.7.2	Distância Máxima Alcançada pelos Flocos nos Dutos	185
5.8	EXTRAPOLAÇÃO PARA ESCALA REAL	185
5.8.1	Decantadores em Escala Piloto Extrapolados para Admitir uma Alta Taxa de Escoamento Superficial	185
5.8.1.1	<i>Procedimento para dimensionamento</i>	185
5.8.1.2	<i>Aplicação do dimensionamento</i>	187
5.8.2	Elaboração de Layouts do Decantador em Escala Real	193
5.8.2.1	<i>Determinação da vazão individual, do número total de dutos e do comprimento individual</i>	193
5.8.2.2	<i>Dimensionamento geral para o arranjo dos dutos</i>	193
5.8.2.2.1	Dutos Losangulares.....	195
5.8.2.2.2	Dutos Circulares.....	198
5.8.3	Exemplo Tipo de Dimensionamento	200
5.8.3.1	<i>Cenário 1: fixando a área superficial de sedimentação e a altura do decantador MLSens iguais ao do decantador de placas inclinadas</i>	202
5.8.3.2	<i>Cenário 2: fixando a vazão e a altura do decantador MLSens iguais ao do decantador de placas inclinadas</i>	208
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	213
7	CONCLUSÕES	219
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	221
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A poluição da água doce está aumentando em muitas regiões do mundo e, embora os problemas de qualidade da água estejam amplamente associados aos países em desenvolvimento, esses também persistem nos países desenvolvidos (ONU, 2018). Além disso, a ação antrópica ocasiona um aporte cada vez maior de sólidos suspensos em águas superficiais, principalmente quando relacionada à urbanização desordenada e à prática da agricultura (VON SPERLING, 1996; LIBÂNIO, 2010). Tanto a poluição como o assoreamento dos mananciais são uma preocupação constante no âmbito do tratamento de água para consumo humano.

O aporte de sólidos suspensos reflete no aumento de turbidez nos corpos hídricos, e tem como consequência a escolha do sistema de potabilização de água por meio do tratamento do tipo convencional, o qual inclui todas as etapas tradicionais de clarificação da água: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

O tratamento do tipo convencional utiliza essencialmente o processo de decantação para remoção desses sólidos suspensos. Os decantadores são responsáveis por remover cerca de 95% dos sólidos suspensos, restando aos filtros 5%. As unidades de decantação são ideais para águas brutas com turbidez acima de 50 uT (RICHTER, 2009; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Atualmente, mesmo que possam apresentar baixa turbidez no estado regular, os mananciais em geral tornam-se turvos (turbidez > 50 uT) após chuvas intensas, fazendo com que os decantadores sejam cada vez mais empregados no tratamento de água para consumo humano; devido a essa variação sazonal de qualidade da água bruta entre períodos de chuva e estiagem.

A urbanização é um fator que contribui para construção de estações de tratamento de água ocupando progressivamente menores áreas. Frente a esse cenário, os processos de potabilização devem ser cada vez mais eficientes em relação à remoção de impurezas e à capacidade de produção por área ocupada (CAVAZZANA, 2006). Ademais, uma importante meta a ser alcançada para concepção e elaboração de estações de tratamento é um sistema com remoção de turbidez que minimize o tempo de detenção da água e o custo de implantação e operação (MATSUMOTO e GUILHERME, 2001).

A decantação é uma das técnicas mais antigas e simples para remoção de partículas suspensas da água (AWWA, 2002). Os tanques de decantação de fluxo horizontal foram os primeiros a serem difundidos no tratamento de água, por volta de século XIX (RICHTER, 2009). Porém, a construção desses tanques chegava a representar um terço do capital total

aplicado nas estações de tratamento de água (GURJAR et al., 2017). Além de ocuparem extensas áreas, a remoção do lodo sedimentado do fundo das unidades era de difícil execução (ARBOLEDA, 2000).

Na segunda metade do século XX, diferentes decantadores foram desenvolvidos para melhorar o desempenho do tanque de sedimentação em um espaço limitado. Nessa época, surgiu o decantador de alta taxa, cuja aplicação é difundida de forma ampla atualmente, com o uso de tubos, dutos especiais ou placas planas paralelas na zona de sedimentação (CULP, 2014). Por outro lado, a concepção de decantadores de alta taxa com módulos tubulares ou placas é essencialmente a mesma desde que surgiu, modificando poucos aspectos, como dispositivos de entrada e saída, materiais utilizados na fabricação e design das placas e tubos.

Na busca de um sistema de tratamento capaz de atender às necessidades atuais, isto é, de obter maior eficiência e produtividade na decantação com fácil operação, este trabalho se propôs a desenvolver uma nova concepção de decantador de alta taxa, do tipo tubular horizontal. Esses decantadores teoricamente são mais eficientes que os demais, devido ao posicionamento dos elementos de sedimentação na horizontal, contudo entraram em desuso devido à dificuldade de limpeza de lodo acumulado nos mesmos. Assim, este estudo pretende fazer parte da evolução histórica dos decantadores, com um novo conceito de autolimpeza dos decantadores de alta taxa com módulos tubulares horizontais.

A autolimpeza dos decantadores de alta taxa atuais se dá pela inclinação dos elementos de sedimentação – placas ou tubos – entre 45° e 60° , que permite que o lodo deslize facilmente (ARBOLEDA, 2000). Entretanto, essa inclinação pode diminuir de 15 a 30% a capacidade de remoção de turbidez da água, visto que a eficiência do decantador decresce à medida que se aumenta o ângulo das placas ou dutos em relação à horizontal (ARBOLEDA, 2000; RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

A ideia do novo decantador surgiu com o propósito de manter os elementos de sedimentação na horizontal (em que a eficiência de decantação é máxima) e, ao mesmo tempo, promover a autolimpeza da zona de sedimentação. Assim, foi idealizada uma abertura inferior, efetuada ao longo do eixo longitudinal desses elementos (dutos), de forma que a partícula sólida, sob ação da gravidade, sedimente e saia pela abertura, não retornando mais ao interior do duto, onde restará apenas água clarificada. Ou seja, espera-se que o floco que sair do duto através dessa abertura, assente até a zona de lodo e não retorne mais ao interior dos elementos horizontais de sedimentação.

Neste trabalho, os ensaios de decantação foram realizados com partículas flocculentas, assim, há necessidade dos processos de coagulação e floculação da água bruta, previamente à

entrada no decantador. Este estudo está considerando a aplicação da nova concepção de decantação apenas no tratamento de água para abastecimento, porém essa mesma técnica tem o potencial de ser empregada para decantadores no tratamento de efluentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e avaliar uma concepção autolimpante na conformação interna de decantadores tubulares horizontais, por meio da disposição de uma abertura longitudinal inferior nos dutos de sedimentação. O trabalho tem a finalidade de atrelar uma elevada eficiência com a autolimpeza, contribuindo para uma inovação na linha evolutiva dos decantadores de alta taxa aplicados no tratamento de água e de efluentes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram delineadas as seguintes especificidades em relação aos aspectos construtivos da nova concepção:

- a) analisar a influência da geometria, quanto ao formato e distância vertical, da seção transversal dos dutos horizontais com abertura longitudinal inferior na: eficiência de remoção de sólidos suspensos; taxa de escoamento superficial máxima admissível; e capacidade de autolimpeza dos elementos de sedimentação (Decantador 1);
- b) avaliar o desempenho de um arranjo de dutos horizontais com abertura longitudinal inferior em relação à eficiência de remoção de sólidos suspensos e à capacidade de autolimpeza (Decantador 2);
- c) extrapolar a conformação interna desenvolvida na unidade de decantação (Decantador 1 e 2), elaborando layouts em escala real.

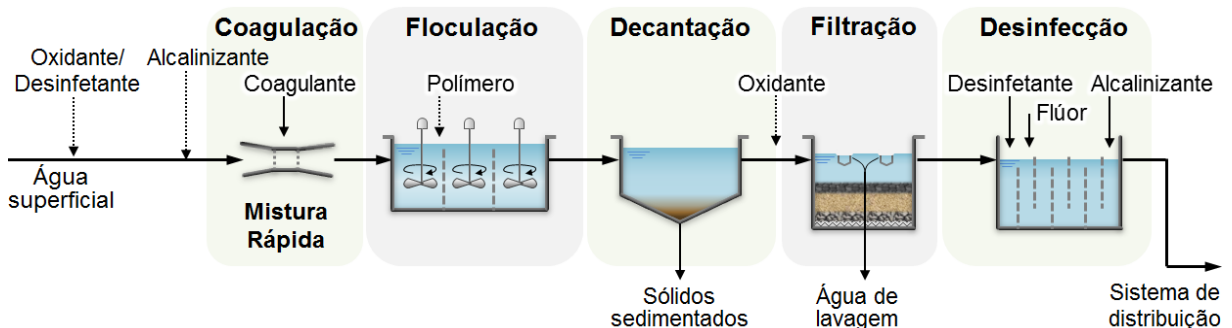
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A decantação no tratamento de água do tipo convencional antecede a filtração e tem como preceito remover partículas floculentas. Por isso, esta revisão irá abordar primeiramente os processos de coagulação e floculação, para posteriormente expor temas sobre decantação, tratando dos tipos existentes de decantadores na literatura e da evolução histórica dos decantadores.

3.1 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

No Brasil, a maioria das estações de tratamento de água é do tipo convencional (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). O tratamento convencional é composto pelas seguintes etapas: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH e fluoretação, observadas na Figura 1 (em alguns casos a decantação é substituída pela flotação). Assim, é responsável por clarificar e desinfetar a água, cumprindo com as finalidades estética, higiênica e econômica do tratamento de água.

Figura 1 – Representação esquemática característica do tratamento de água do tipo convencional.



Fonte: Adaptado de Crittenden (2012).

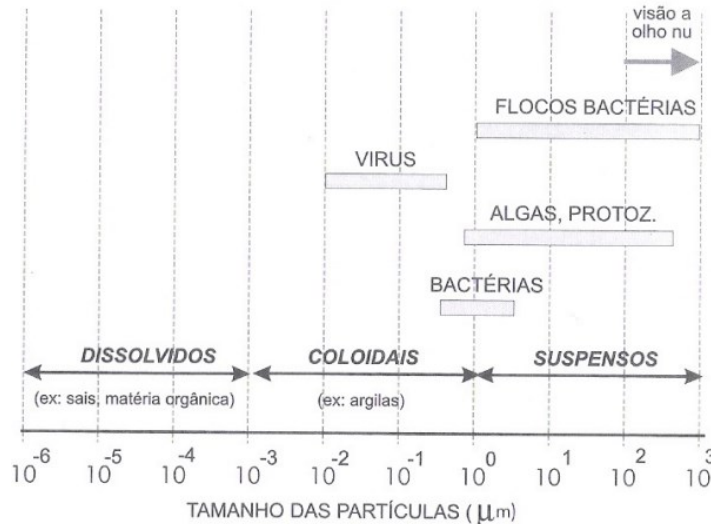
Como as unidades de tratamento são em série e em contínuo, prevê-se que a unidade subsequente seja afetada substancialmente pela eficiência da etapa anterior. Assim, uma coagulação e floculação bem realizadas são fundamentais para uma boa decantação.

As águas naturais possuem partículas sólidas que devem ser removidas ao longo desse processo de tratamento. Essas partículas apresentam diferentes tamanhos, o que permite classificá-las em partículas suspensas, coloidais e dissolvidas (Figura 2).

Os sólidos suspensos, que conferem turbidez à água, podem ser removidos por sedimentação simples, enquanto que os sistemas coloidais necessariamente precisam ser desestabilizados e agregados pelo processo de coagulação seguido de floculação, antes da sedimentação ou flotação (no caso do tratamento convencional). Já as partículas dissolvidas

são muito estáveis na água, sendo removidas geralmente por processos como de filtração em membranas, destilação e troca iônica (PIVELI E KATO, 2005).

Figura 2 – Classificação e distribuição das partículas em função do tamanho.



Fonte: Von Sperling (2005).

As partículas coloidais, geralmente são carregadas negativamente, repelindo-se umas das outras (AWWA, 2002). A coagulação é o processo que ocorre por meio da adição de um produto químico (coagulante) em meio líquido, cuja utilidade é desestabilizar os colóides presentes nesse líquido (RICHTER, 2009).

A introdução do coagulante deve ser feita de maneira enérgica, isto é, sob forte agitação, para que todas as moléculas de água entrem em contato com o mesmo. À medida que as substâncias químicas deste se hidrolisam, formam-se precipitados insolúveis carregados positivamente que, ao adsorverem à superfície da partícula coloidal, neutralizam as cargas negativas desta ou formam pontes entre as cargas. Desse modo, diminuem as forças de repulsão que tendem manter as partículas coloidais afastadas (CRITTENDEN et al., 2012).

A coagulação é um processo rápido, cuja duração varia desde décimos de segundo a cerca de 100 s (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Porém, tipicamente possui duração menor que 10 s (CRITTENDEN et al., 2012). Ademais, os misturadores do tipo hidráulico são conhecidos por atingirem tempos próximos a 1 s. Por isso, essa etapa em que acontece a coagulação é chamada de mistura rápida.

A intensidade da turbulência gerada na mistura rápida pode ser avaliada pelo gradiente de velocidade, que varia usualmente entre 300 e 1200 s^{-1} (RICHTER, 2009). A norma ABNT NBR 12216/92, sobre “Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público”, sugere que a dispersão de coagulantes metálicos hidrolisáveis seja

realizada a gradientes de velocidade compreendidos entre 700 e 1100 s^{-1} , em um tempo de mistura não superior a 5 s, caso não tenham sido efetuados ensaios de tratabilidade para determinar um gradiente ideal.

A eficiência da coagulação dependente do gradiente de velocidade e tempo da mistura rápida, do pH da mistura, temperatura e concentração de impurezas no meio líquido (características da água bruta), bem como do tipo e dosagem do coagulante (AZEVEDO NETTO, 1976; DI BERNARDO, 1993).

Os primeiros autores a dedicarem suas pesquisas para identificar a influência da coagulação na remoção de turbidez foram Amirtharajah e Mills (1982). Esses autores lembram que, para atingir maior eficiência na remoção de turbidez, deve ser avaliado o par de valores “pH de coagulação x dosagem de coagulante”. Assim, é preciso analisar ambos os parâmetros em conjunto por meio de diagramas de coagulação, fundamentados na solubilidade do alumínio, dosagem deste e pH da água.

As reações químicas e mecanismos que ocorrem na coagulação viabilizam a agregação das impurezas presentes na água, pois as desestabiliza. Assim, a floculação ocorre em seguida da coagulação e consiste em um processo físico no qual a água é submetida a uma mistura lenta. O movimento aumenta a probabilidade de colisões entre as partículas, que vão se agregando uma as outras e se tornando mais densas e maiores, ou seja, mais propícias a sedimentarem.

Como a agitação é lenta para os flocos não cisalharem, o tempo de detenção é maior, usualmente entre 20 e 40 min. A norma ABNT NBR 12216/92 recomenda tempos de floculação entre 20 e 30 min para floculadores hidráulicos, e entre 30 min e 40 min para floculadores mecânicos; quando não são realizados ensaios de tratabilidade. As unidades mecânicas são mais suceptíveis a ocorrência de curto-circuitos, isto é, de a partícula permanecer no tanque durante um tempo menor que o estipulado no projeto, por isso, normalmente se indicam tempos de detenção maiores.

Também quando não há ensaios de tratabilidade, a norma ABNT NBR 12216/92 indica gradientes de velocidade entre 70 e 10 s^{-1} , como máximo no primeiro compartimento e mínimo no último, respectivamente. Souza (2005) compilou algumas faixas de valores de Gradientes de velocidade (G) médios presentes na literatura, cujos valores estão contidos na Tabela 1. A partir do momento em que o agregado (floco) se forma, o gradiente de velocidade não pode aumentar nos trechos seguintes até entrar na zona de sedimentação do decantador, senão os flocos podem quebrar com o aumento de turbulência.

Tabela 1 – Faixa de valores do gradiente médio de velocidade para flocculadores, recomendada na literatura.

Publicações	Faixas de valores de G (s⁻¹)
Camp (1953)	20 – 74
Monk e Willis (1987)	15 – 80
Elmaleh e Jabbouri (1991)	10 – 100
CEPIS (1995)	30 – 60
McConnachie e Liu (2000)	10 – 100

Fonte: Souza (2005)

O processo subsequente de sedimentação requer flocos volumosos e densos, por isso a coagulação/ floculação deve ser por varredura (ou arrasto). O mecanismo de varredura procede quando a dosagem de coagulante é tão elevada, que supera o limite de solubilidade do coagulante na água (ARBOLEDA, 2000). Os hidróxidos precipitados do coagulante ficam sob forma de gel que, além de adsorver e neutralizar, envolvem os coloides e as partículas suspensas, possuindo a capacidade de formar flocos maiores que em outros mecanismos de coagulação.

Por formar flocos maiores e, conseqüentemente, com maiores velocidades de sedimentação, o mecanismo de varredura é amplamente adotado em estações de tratamento de água do tipo convencional (LIBÂNIO, 2010).

3.2 PRODUTOS QUÍMICOS APLICADOS NA COAGULAÇÃO

Há diversos coagulantes empregados no tratamento de água e efluentes, geralmente são sais de alumínio ou de ferro – como sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto férrico, sulfato ferroso clorado e hidróxicloreto de alumínio – e polímeros inorgânicos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Os coagulantes à base de sais de alumínio e ferro são propensos a reduzir o pH da água, devido seu comportamento ácido quando em fase líquida (FERREIRA FILHO, 2017). Neste estudo, optou-se por utilizar o hidróxicloreto de alumínio como coagulante.

O hidróxicloreto de alumínio, também conhecido como cloreto de polialumínio (PAC), é um sal de alumínio pré-polimerizado, de fórmula genérica $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$. (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017), caracterizado por ser um coagulante líquido viscoso de aparência acastanhada.

Segundo Constantino e Yamamura (2009), uma das vantagens desse coagulante é que, quando adicionado à água, ele libera uma quantidade de ácido significativamente menor que outros coagulantes tradicionais (comparando em igualdade de dosagem de íons

metálicos). Dessa forma, tal coagulante tem menor influência no pH da mistura, evitando ou reduzindo a necessidade de pré-alkalinização.

Além da larga utilização do PAC em ETAs e da reduzida variação do pH da mistura, o mesmo revela-se mais eficaz do que o sulfato de alumínio na maioria dos casos. Considerando em igualdade de dosagem do íon Al^{+3} , a eficácia do PAC é, em média, 2,5 vezes superior à dos outros sais de alumínio habitualmente usados na remoção de substâncias coloidais (PAVANELLI, 2001).

Hashimoto et. al (2017) constatou que o PAC teve maior eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e células de cianobactérias, em menores dosagens de coagulante, ao ser comparado com o sulfato de alumínio. Costa (2011), Hashimoto et. al (2017) e outros autores que compararam ambos os coagulantes, também concluíram que o sulfato de alumínio acidifica mais a água do que o PAC.

Outras vantagens do PAC são: a efetividade em uma ampla faixa de pH de águas brutas; a forma física líquida que facilita o manuseio, estocagem e aplicação; maior poder de coagulação; e maior poder de floculação, por ser pré-polimerizado, diminuindo a necessidade de agentes floculantes (CONSTANTINO e YAMAMURA, 2009). Assim, tal produto favorece tecnicamente vantagens operacionais e uma otimização do tratamento de água para abastecimento, bem como apresenta melhor relação custo benefício comparado a demais coagulantes (SILVA E TORREZAO, 2011).

3.3 PRINCÍPIOS DA DECANTAÇÃO

A sedimentação é a separação física entre a água e os sólidos suspensos, por meio da ação da força da gravidade. As partículas de densidade superior à da água apresentam um peso que supera a força de arraste e o empuxo hidrostático, por isso, iniciam um movimento descendente e se depositam em uma superfície ou zona de armazenamento.

A sedimentação de partículas discretas, portanto, é um processo natural, de forma que não são necessários investimentos adicionais para sua ocorrência (BANDROWSKI; HEHLMANN; MERTA; ZIOLO, 1997).

A sedimentação constitui um dos processos mais comuns no tratamento de água (SALEM, OKOTH, THOMING, 2011; TARPAGKOU e PANTOKRATORAS, 2014; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Tal processo é indicado para o tratamento de águas com turbidez elevada – acima de 50 uT – e que apresentem pouca concentração de partículas de densidade baixa, como por exemplo algas (RICHTER, 2009; DI BERNARDO;

DANTAS; VOLTAN, 2017). O principal objetivo da sedimentação é produzir um efluente clarificado (VON SPERLING, 1996).

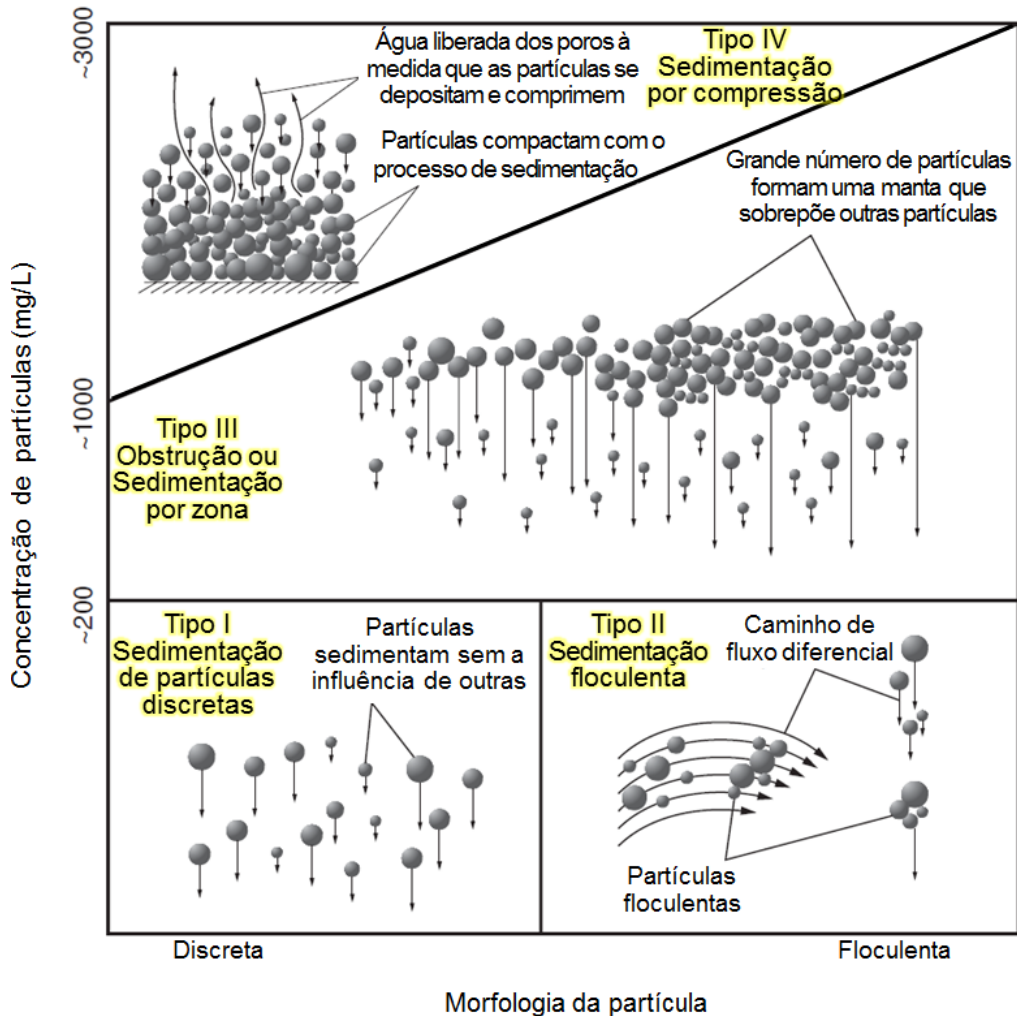
Diversos autores, como Metcalf & Eddy (2003), Richter (2009), Crittenden e colaboradores (2012) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) relatam a existência de quatro tipos distintos de sedimentação, descritos a seguir:

- a) **tipo I - Sedimentação discreta:** é a sedimentação de partículas cujas propriedades físicas (tamanho, forma e densidade) e velocidade são constantes ao longo do processo, ou seja, são inalteráveis à medida que sedimentam, pois não existe interação entre as mesmas (ex.: sedimentação da areia em desarenadores);
- b) **tipo II - Sedimentação floculenta:** as partículas apresentam características físicas alteráveis, assim, quando colidem no decorrer processo, formam agregados de dimensões e massa maiores, com velocidade de sedimentação variável (ex.: sedimentação de flocos na parte superior de decantadores de Estações de Tratamento de Esgoto – ETEs e Estações de Tratamento de Água – ETAs);
- c) **tipo III - Sedimentação em zona:** nesse caso, há uma elevada concentração de sólidos, ou seja, as partículas ficam muito próximas e a sedimentação de uma interfere e interage com a outra. É caracterizada pela formação de um manto que sedimenta como uma massa única (bloco) de partículas (ex.: sedimentação na parte inferior dos decantadores de ETEs ou ETAs);
- d) **tipo IV - Sedimentação por compressão:** a concentração de sólidos é ainda mais elevada, de modo que o peso de uma partícula sobre a outra faz comprimir a estrutura das mesmas, reduzindo seus volumes com a liberação de água e se compactando como lodo (ex.: sedimentação em adensadores de lodo).

Crittenden e colaboradores (2012) propuseram um gráfico esquemático para explicar as quatro classificações de sedimentação, embasadas na concentração e morfologia das partículas, como mostrado na Figura 3.

Nos tanques de decantação, ou simplesmente decantadores, ocorre o movimento descendente da partícula sólida, chamado de sedimentação, e o movimento ascendente da água, chamado de decantação. Usualmente, a sedimentação só é chamada de decantação quando envolve partículas floculentas, isto é, quando existem os processos anteriores de coagulação e floculação (RICHTER, 2009).

Figura 3 – Relação entre o tipo de sedimentação, concentração e natureza flocculentas das partículas.



Fonte: imagem traduzida de Crittenden et al. (2012).

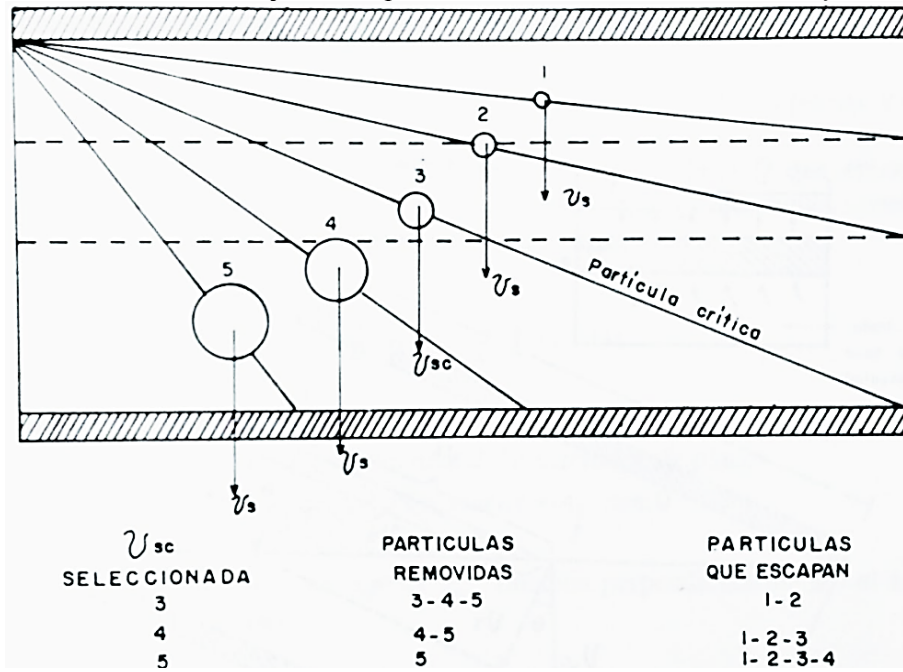
A velocidade de sedimentação crítica é a velocidade vertical mínima que a partícula mais desfavorável deve apresentar para conseguir sedimentar no fundo do decantador. Ou seja, aquela em que a partícula consegue ser removida imediatamente antes de chegar à zona de saída.

Mantendo a velocidade de escoamento horizontal (v_0), a partícula mais desfavorável que apresentar uma velocidade de sedimentação infinitamente menor do que a crítica, não será removida, pois seu peso não foi o suficiente para sedimentar ao longo do comprimento do decantador.

A Figura 4 explica melhor esse conceito ao mostrar a trajetória das partículas e apontar qual é a partícula com velocidade de sedimentação crítica, que define quais partículas vão ser removidas pelo decantador e quais vão seguir para a unidade de tratamento seguinte.

Logo, as partículas removíveis serão aquelas que possuírem velocidade de sedimentação (v_s) igual ou superior à velocidade de sedimentação crítica (v_{sc}) (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991).

Figura 4 –Partículas discretas de diferentes tamanhos que entram na posição mais desfavorável para serem removidas, com foco à trajetória da partícula com velocidade de sedimentação crítica.



Legenda: v_s = velocidade de sedimentação; v_{sc} = velocidade de sedimentação crítica.

Fonte: Arboleda (2000).

A teoria de Hazen (1904), que constatou a influência da área superficial de sedimentação na eficiência de remoção de partículas discretas, foi fundamentada em um modelo de tanque de sedimentação ideal, onde algumas considerações foram feitas:

- a sedimentação ocorre sem qualquer interferência externa ao fenômeno;
- as partículas, mesmo sendo de diferentes tamanhos, se comportam como partículas discretas com mesma velocidade de sedimentação, ou seja, acontece a sedimentação do tipo I;
- há quatro zonas independentes no decantador: entrada, saída, de sedimentação e de lodo;
- a distribuição de partículas é uniforme na zona de entrada: a concentração das partículas é a mesma em todos os pontos da seção transversal da entrada;
- o regime do fluxo é laminar na zona de sedimentação: a direção do fluxo é horizontal e a velocidade é a mesma em todos os pontos, por ser um modelo de fluxo pistão;

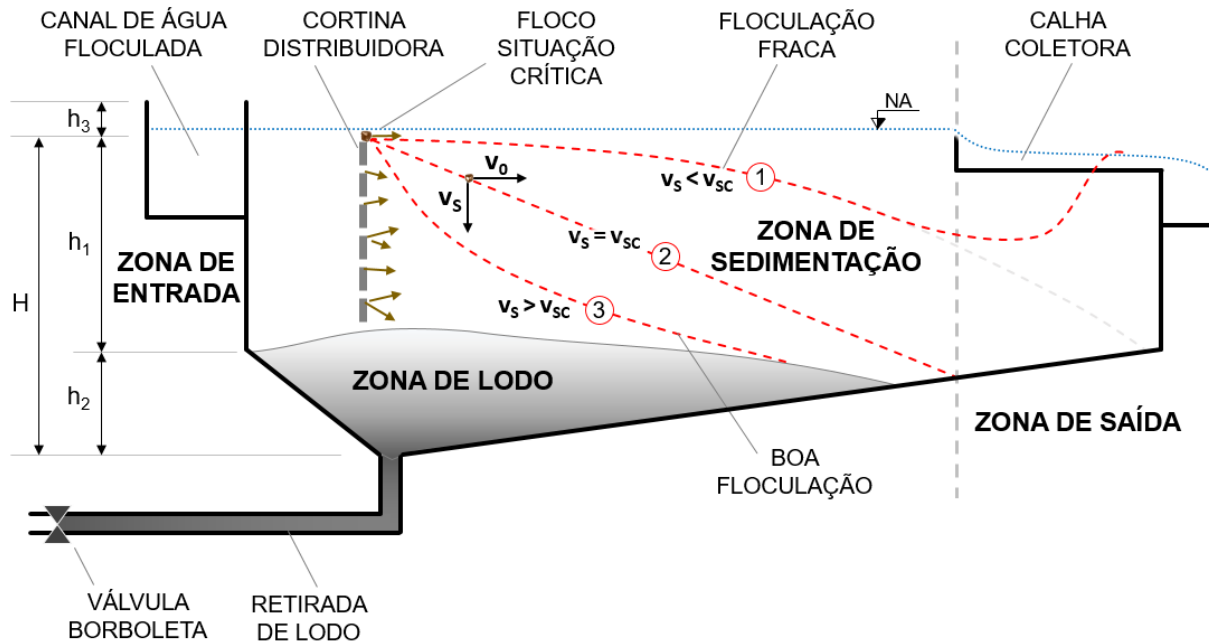
f) não há ressuspensão de sólidos sedimentados: toda partícula que chega a zona de lodo é removida.

É importante entender a função de cada zona independente do decantador: (1) na zona de entrada, a água é distribuída uniformemente na seção transversal; (2) ao entrar na zona de sedimentação, deve haver condição hidráulica do escoamento que possibilita as partículas assentarem; (3) as partículas que conseguem atingir o fundo do decantador (superfície de contato) ficam armazenadas temporariamente na zona de lodo; (4) já as que não alcançam o fundo ao longo do comprimento do decantador, chegam na zona de saída e seguem para próxima unidade.

Essas quatro zonas distintas propostas por Hazen (1904) são ilustradas na Figura 5, na qual pode-se visualizar igualmente o vetor horizontal de velocidade de escoamento (v_0) e o vetor vertical da velocidade de sedimentação (v_s) da partícula. Considerando uma mesma densidade das partículas formadas pela adição de determinado um produto químico como coagulante, o que irá influenciar na velocidade de sedimentação será o diâmetro da partícula.

Na Figura 5, também são representadas três trajetórias de partículas na zona de sedimentação. A trajetória 1 é típica de partícula floculenta leve, com diâmetro menor do que o diâmetro crítico para partícula ser removida. Já a trajetória 2 e 3 representam a de uma partícula discreta e floculenta, respectivamente; com diâmetro igual e superior ao diâmetro crítico, portanto com peso superando às forças de atrito e empuxo. Na trajetória 1, a velocidade de sedimentação é inferior à velocidade de sedimentação crítica (v_{sc}), portanto essa partícula chegará à zona de saída e não será removida pelo decantador. O mesmo não ocorre para as demais trajetórias (2 e 3), onde as partículas possuem velocidade de sedimentação igual ou superior à v_{sc} , significando que as mesmas ficarão retidas na zona de lodo da unidade de decantação.

Figura 5 – Esquema de corte longitudinal de decantador horizontal ideal.



Legenda: v_0 = velocidade de escoamento longitudinal; v_s = velocidade de sedimentação; v_{sc} = velocidade de sedimentação crítica; H = altura do decantador; h_1 = altura da zona de sedimentação; h_2 = altura da zona de lodo; h_3 = borda livre.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, nos decantadores reais, podem ocorrer diversos fatores que reduzem a eficiência da decantação, destacando-se (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017):

- má distribuição da água flocculada na entrada dos decantadores ou da vazão total entre as unidades em paralelo, o que faz com que os decantadores operem com taxa de escoamento superficial diferente entre si;
- coleta desuniforme da água clarificada, causada, por exemplo, pela existência de caminhos preferenciais na unidade;
- métodos inadequados de descarte de lodo;
- formação de correntes de água, possibilitando a existência de zonas mortas no fluxo de água do decantador.

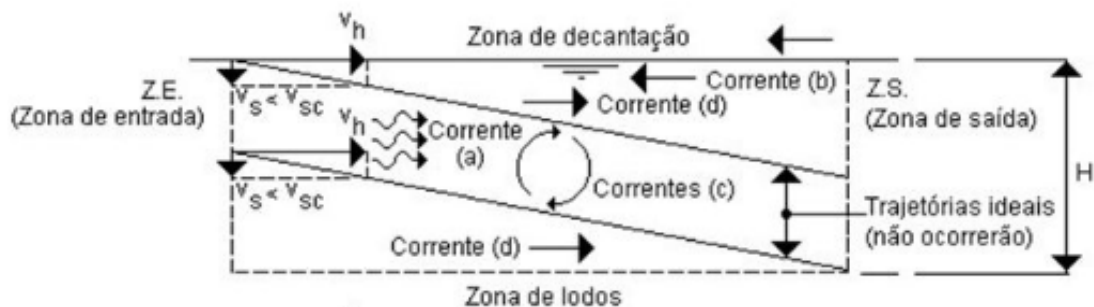
Todos esses fatores são relacionados com a função específica de cada zona do decantador (entrada, saída, lodo e sedimentação), por isso a importância de compreendê-la.

Dentre os fatores citados, as correntes de fluxo de água desempenham papel predominante na redução da eficiência das condições ideais de rendimento (AWWA, 2002). Essas correntes podem gerar turbulência e mesmo a ressuspensão dos flocos sedimentados na zona de lodo. Seguem as principais correntes (LEME, 1979), ilustradas na Figura 6:

- correntes de refluxo: provocadas pela inércia do líquido afluyente;

- b) correntes superficiais: causadas pela ação dos ventos, provocando desvio do fluxo superficial;
- c) correntes de convecção: causadas pela diferença de temperatura, ocasionando curtos-circuitos hidráulicos;
- d) correntes de densidade: causadas pela diferença de densidade do líquido aflrente com o que se encontra dentro do decantador, essa diferença de densidade, por sua vez, pode ser decorrente de diferença de temperatura.

Figura 6 – Tipo de correntes de água formadas em decantadores reais.



Legenda: correntes (a), (b), (c), (d) = de refluxo; superficial; de convecção; e de densidade, respectivamente.

Fonte: Vianna (2002).

O processo de decantação bem-sucedido em relação à eficiência e estabilidade dependem, em primeiro plano, do desempenho das etapas anteriores (coagulação e floculação), mas também de fatores e parâmetros próprios, bem como: taxa de aplicação superficial, hidrodinâmica do decantador, ocorrência de curtos circuitos e zonas mortas, presença de dispositivos de entrada e saída adequados, e operações de limpeza do decantador (OLIVEIRA et al., 2007). Isto é, o sucesso do tratamento depende tanto de um projeto bem executado como da operação do sistema.

3.4 PRINCIPAIS TIPOS DE DECANTADORES

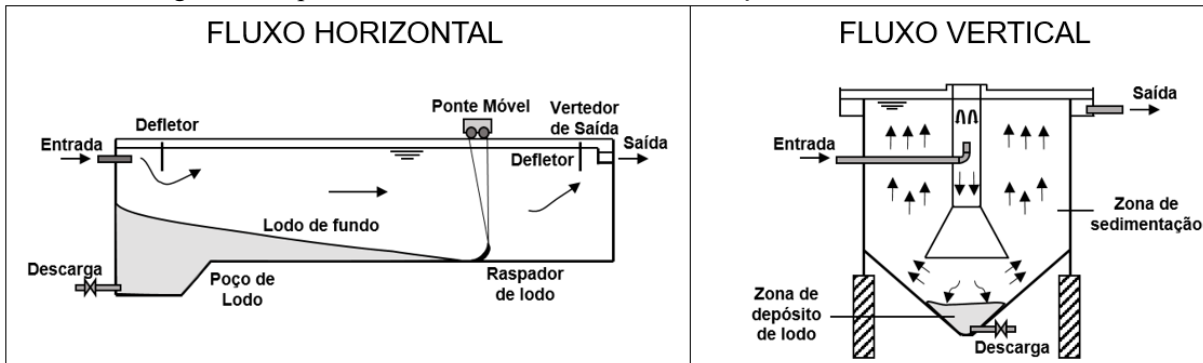
Os tanques de sedimentação ou decantadores podem ser classificados diferentemente, de acordo com o aspecto analisado:

a) em função da direção do escoamento da água:

- i) Decantador de Escoamento Horizontal: a água escoar na direção longitudinal, sendo que o comprimento é a dimensão predominante;
- ii) Decantador de Escoamento Vertical: a água escoar em movimento ascendente da parte inferior até a superfície dos tanques, ou mesmo descendente, antes de ascender.

Na Figura 7, foram ilustrados os decantadores de escoamento horizontal e vertical.

Figura 7 – Tipos de decantador de acordo com a direção do fluxo de escoamento.



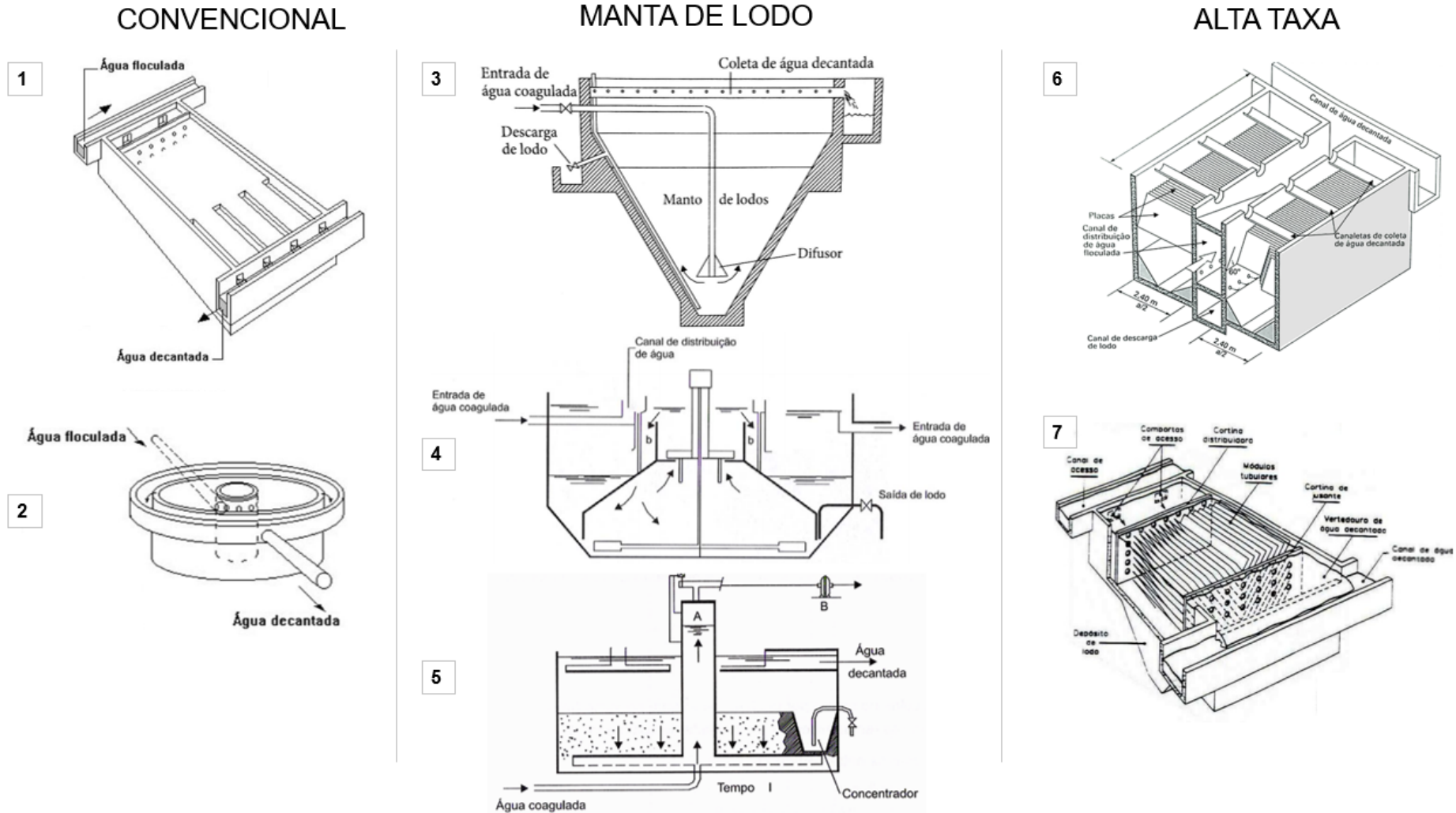
Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005); Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

b) quanto à operação ou princípio de funcionamento podem ser agrupados em:

- i) Convencional (clássico): recebe a água floculada e processa apenas a decantação (escoamento turbulento). A taxa de escoamento superficial aplicada normalmente varia entre 20 e 60 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (RICHTER, 2009);
- ii) de Contato de Sólidos ou Floco Decantador: promove simultaneamente a floculação e decantação no mesmo tanque, formando um manto de lodo (ex.: tipo *Pulsator*, tipo *Accelerator*). Aplica-se uma taxa de escoamento superficial usualmente entre 50 e 100 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (LIBÂNIO, 2010);
- iii) de Alta Taxa ou Tubular: utiliza-se placas paralelas ou elementos tubulares para direcionar o fluxo. Os decantadores tubulares ou de alta taxa, também são denominados tecnicamente e comercialmente como decantadores lamelares, pois as placas e módulos tubulares possuem espessura delgada, semelhante a lâminas. Uma vantagem é possuírem escoamento laminar na zona de sedimentação. A taxa de escoamento superficial desse tipo é maior, indicando-se comumente entre 120 e 180 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (ARBOLEDA, 2000; FERREIRA FILHO, 2017) e 180 e 240 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (CETESB, 1976).

Na Figura 8 foram compiladas imagens encontradas na literatura para os principais tipos de decantadores aplicados tanto no tratamento de água quanto efluentes.

Figura 8 – Diferentes tipos de decantadores de acordo com a operação ou funcionamento.



Legenda: 1 = Convencional de fluxo horizontal; 2 = Convencional de fluxo vertical; 3 = Manta de lodo ou contato de sólidos convencional; 4 = Manta de lodo do tipo *Accelerator*; 5 = Manta de lodo do tipo *Pulsator*; 6 = Alta taxa com placas paralelas, de fluxo vertical ascensional; 7 = Alta taxa com placas paralelas, de fluxo horizontal.

Fonte: Vianna (2002); Richter (2009); Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017)

3.4.1 Decantador Convencional Horizontal

Os decantadores convencionais são grandes tanques retangulares com o escoamento horizontal (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). O período de detenção varia de 1,5 a 4,5 h e a taxa de escoamento superficial de 20 a 60 m³/m².d (RICHTER, 2009; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Na Figura 9, são mostradas fotos desse tipo de decantador.

Figura 9 – Decantador convencional de escoamento horizontal.



Fonte: <https://www.sidneyseckler.com/>.

Em razão de serem unidades bastante robustas (que ocupam uma área significativa da estação) e apresentarem elevado custo construtivo, normalmente são aplicadas em estações de tratamento de água de grande porte. A grande área superficial ocupada é uma das maiores limitações desse tipo de decantadores (FERREIRA FILHO, 2017).

As condições hidráulicas em decantadores convencionais de fluxo horizontal promovem um regime de escoamento turbulento, com número de Reynolds variando entre

2.000 e 200.000. Nessa situação, as partículas se movimentam de forma irregular e errática, ou seja, o regime interfere na sedimentação (CETESB, 1976).

Geralmente, os decantadores convencionais são analisados por meio de suas partes construtivas básicas de entrada, sedimentação, saída e zona de lodo.

Em relação à entrada, a distribuição dos flocos deve evitar ao máximo o rompimento destes, se possível conectando a etapa final da floculação diretamente com a entrada do decantador, a fim de ajudar a distribuir o fluxo (ARBOLEDA, 2000; FERREIRA FILHO, 2017).

Na zona de sedimentação, para garantir um campo de velocidade mais uniforme possível e um regime mais próximo do pistonado, é indicado que os decantadores de fluxo horizontal apresentem uma relação adequada entre o comprimento (L) e a largura (b) do tanque. Comprimentos muito pequenos dificultam uma boa distribuição da água e, em contrapartida, se muito grandes, podem acarretar em velocidades de escoamento longitudinal que arrastem os flocos para zona de saída (AZEVEDO NETTO, 1976). Para o parâmetro L/b, normalmente adota-se um valor entre 2,25 e 10, sendo mais comum entre 3 e 4 (RICHTER, 2009).

O lodo acumulado deve ser removido por sistemas mecânicos (raspadores de lodo), sistemas hidráulicos ou ainda manuais. O intervalo entre uma remoção e outra depende do modo de limpeza. Se for manual, a unidade é limpa a cada 20 a 40 dias, necessitando o esgotamento do decantador para isso. Caso for mecânica ou hidráulica, como é a realidade dos projetos mais recentes de decantadores convencionais de fluxo horizontal, o sistema de remoção é semicontínuo e não necessita da interrupção de operação da unidade. No mercado, existe um grande número de tipos de raspadores mecânicos, assim como muitos fornecedores (FERREIRA FILHO, 2017).

É recomendado que as calhas de coleta de água decantada nesse tipo de decantadores sejam instaladas no último terço do tanque, mais próximas à saída, porém o comprimento das mesmas não deve ultrapassar a 20% do comprimento do decantador. Outro fator importante é que as mesmas devem conter dispositivos que promovam uma coleta uniforme; uma das formas é com vertedores triangulares instalados ao longo das calhas. Para a coleta ser uniforme, essas calhas não devem ser afogadas, para não ocorrer o arrasto de flocos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; FERREIRA FILHO, 2017).

3.4.2 Decantador de Alta Taxa

Os decantadores de fundos múltiplos foram os primeiros criados com diminuição da distância vertical necessária para remoção dos flocos, na busca de uma taxa mais elevada. Tais decantadores superam o decantador convencional horizontal, pois a área de contato para os flocos sedimentarem é maior, assim, é possível aplicar uma taxa superior ocupando uma mesma área vista em planta (RICHTER, 2009).

Os decantadores de alta taxa atuais são um aperfeiçoamento das unidades com fundos múltiplos, desenvolvidos com base nas experiências apresentadas por Hazen, em 1904 (CARISSIMI, 2007).

A decantação de alta taxa significa o uso de unidades que proporcionam pequenas distâncias verticais para o floco percorrer e ser removido, assim como, que possuem tempos de detenção não superiores a 15 min e eficiência de remoção de turbidez superior à de decantadores convencionais, quando comparados sob mesmas condições operacionais (LEME, 1979).

O principal fator que difere os decantadores de alta taxa dos decantadores convencionais é o emprego de elementos de sedimentação – placas planas paralelas ou módulos tubulares – no interior dos mesmos, também conhecidos como lamelas.

O emprego desses elementos no interior das unidades diminui a turbulência no fluxo de água. Por isso, nesses decantadores o regime é de escoamento laminar (Reynolds menor que 2000), assumindo valores de Reynolds geralmente menores que 500, o que permite que a trajetória das partículas seja mais regular e propícia à sedimentação (CETESB, 1976; ARBOLEDA, 2000).

Por outro lado, Richter (2009) cita que o número de Reynolds tem sido um falso critério adotado para decantadores de alta taxa, pois não necessariamente quanto menor seu valor, mais eficientes serão os decantadores. Na realidade, esse número é um parâmetro resultante de outros critérios relevantes bem adotados, como a taxa de escoamento superficial e velocidade longitudinal máxima admissível.

As taxas de escoamento superficial são calculadas em função da vazão aplicada na área, vista em planta, efetivamente coberta pelos elementos de sedimentação, e geralmente estão compreendidas entre 180 e 240 m³/m².d, cinco vezes as taxas adotadas em decantadores convencionais (CETESB, 1976).

Devido à redução de área superficial para tratar a mesma vazão, os decantadores de alta taxa têm sido utilizados – desde as primeiras concepções – na maioria das estações pré-

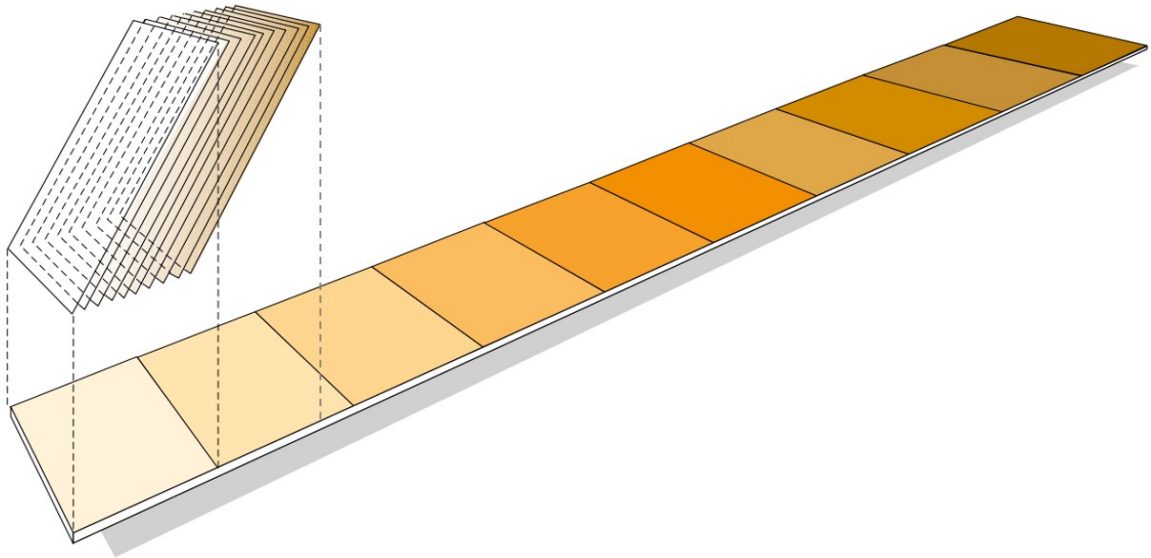
fabricadas de tratamento de água em operação no Brasil (LIBÂNIO, 2010), e cada dia mais as estações vem adaptando ou modificando seus decantadores para de alta taxa.

A área de contato oferecida para os flocos sedimentarem aumenta devido a colocação de diversas camadas de elementos de sedimentação em mesma área superficial, sendo muito superior quando comparada ao decantador convencional (superioridade proporcional ao número de camadas sobrepostas).

A Figura 10 exemplifica essa vantagem dos decantadores de alta taxa. A área superficial (vista em planta) de uma placa inclinada representa um quadrado no chão. E a área superficial de 10 placas paralelas espaçadas ocupa pouco menos de dois quadrados na ilustração, porém a área de contato disponível para os flocos é equivalente a todos os quadrados.

Na teoria, um decantador convencional precisaria da área superficial de todos os quadrados ao longo do chão na Figura 10, que é sua área de contato disponível, ou seja, uma área superficial cerca de 6 vezes maior do que a ocupada pelas placas paralelas inclinadas (decantador de alta taxa), neste exemplo.

Figura 10 – Demonstração da redução da área superficial pelo aumento da área de contato para os flocos sedimentarem com o uso de placas planas paralelas inclinadas em decantadores.



Fonte: Nordic Water, 2016.

Tarpagkou e Pantokratoras (2014) compararam decantadores lamelares com placas paralelas inclinadas com decantadores convencionais, usando métodos de dinâmica computacional de fluidos. Os autores obtiveram eficiência de remoção de sólidos da ordem de 93% no primeiro e 75% no segundo. Os resultados mostraram que os decantadores de alta

taxa influenciam o campo de fluxo e aumentam a eficiência de sedimentação em pelo menos 20% em comparação com o desenho convencional.

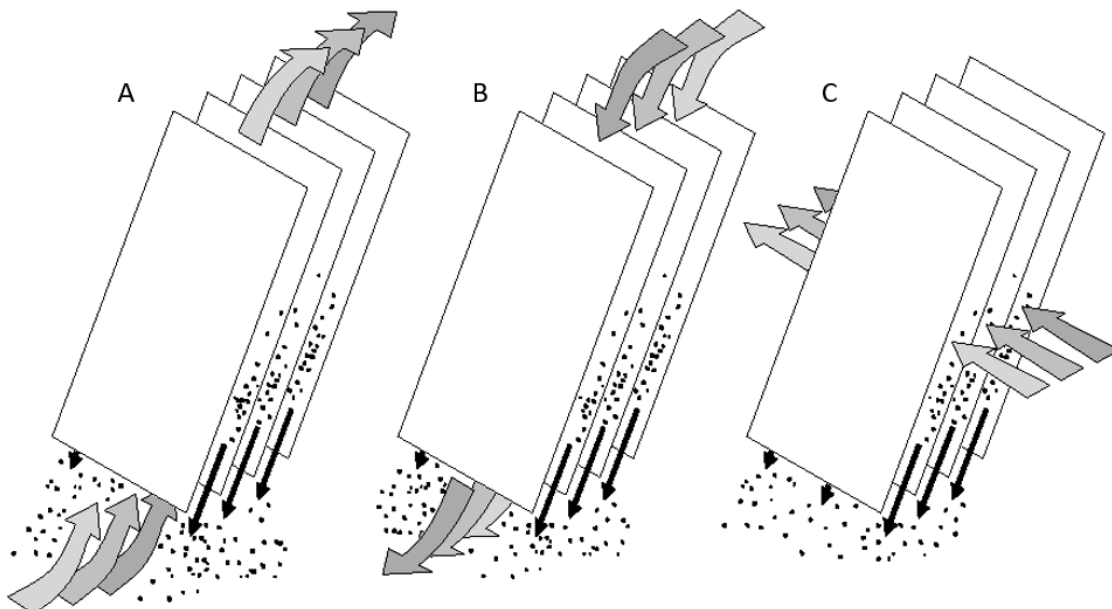
Gurjar et. al (2017) realizaram o mesmo comparativo, ressaltando a diferença do tempo de detenção, de 2 a 4 h no decantador convencional e de 15 a 20 min no de alta taxa. Os autores também avaliaram dutos quadrados com área da seção de 25 cm², com comprimento de 1 m e inclinação de 60°. A média de remoção de turbidez foi de 70 a 80% em comparação ao decantador do tipo convencional.

Algumas vantagens dos decantadores de alta taxa são: design compacto quando comparados com decantadores convencionais; alta eficiência na separação de sólidos e líquidos; fácil instalação; e baixo custo de manutenção.

De acordo com *AWWA* (2002), os decantadores com placas inclinadas podem apresentar os seguintes fluxos (Figura 11):

- contracorrente: água no fluxo vertical ascendente e partícula descendente (mais comuns);
- concorrente ou fluxo paralelo: água no fluxo vertical descendente e partícula também no mesmo sentido;
- fluxo cruzado: água no fluxo horizontal e partícula no movimento descendente.

Figura 11 – Fluxos aplicados em decantadores com placas planas paralelas na zona de sedimentação.



Legenda: Fluxos A, B, C = contracorrente, concorrente, e cruzado, respectivamente.

Fonte: Weiss (2014).

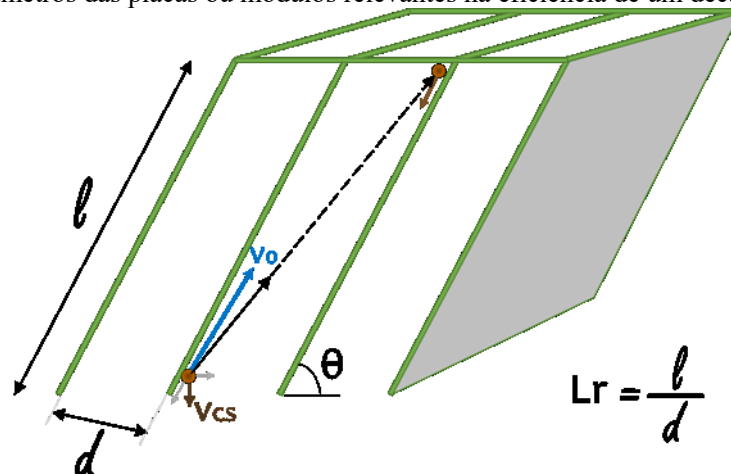
Nos decantadores de alta taxa com água no fluxo horizontal e sólidos no sentido descendente (de fluxo cruzado), tem-se a vantagem de redução dos custos de construção, visto

que a profundidade destas unidades é cerca de 1 m menor do que os decantadores de fluxo vertical (contracorrente ou corrente paralela). Ainda pode-se destacar que há menor ressuspensão de sólidos sedimentados que nos decantadores de contracorrente e concorrente (com fluxo de corrente paralela), bem como que o sistema de canais e de apoio das placas paralelas é mais simples (ARBOLEDA 2000).

No entanto, Arboleda (2000) destaca que há interrogações quanto ao fluxo cruzado. Não se sabe até que largura de placa a sedimentação é eficiente. Também há limitação quanto ao tamanho das unidades de tratamento, sendo recomendada a utilização em ETAs de tamanho pequeno e médio, inconveniente que não há com os decantadores de fluxo vertical.

Algumas grandezas geométricas são relevantes para a eficiência do decantador, como o ângulo formado com o plano horizontal, o comprimento e o espaçamento dos dutos ou placas paralelas, como demonstrado na Figura 12

Figura 12 – Parâmetros das placas ou módulos relevantes na eficiência de um decantador.



Legenda: l = comprimento da placa ou duto; d = espaçamento ou diâmetro; θ = ângulo formado entre placa ou duto e o plano horizontal; L_r = comprimento relativo; v_0 = velocidade de escoamento longitudinal; v_{cs} = velocidade crítica de sedimentação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

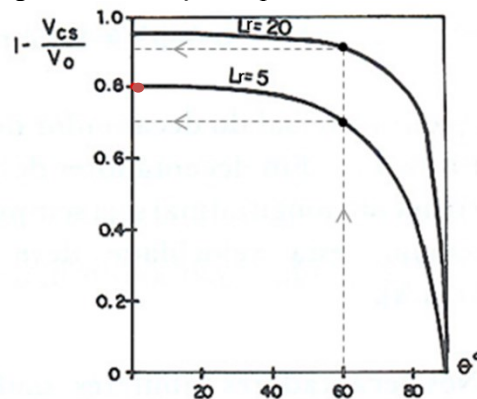
O comprimento relativo (L_r) é um parâmetro essencial no dimensionamento dos decantadores de alta taxa, cujo valor é resultante da razão entre o comprimento dos elementos de sedimentação (l) pelo espaçamento entre os mesmos (d), respectivamente. Quanto menor o diâmetro ou espaçamento e quanto maior o comprimento do elemento de sedimentação, maior o comprimento relativo (L_r). Quanto maior o L_r , maior a eficiência de sedimentação (FERREIRA FILHO, 2017).

Yao (1970) afirma que a velocidade de sedimentação crítica das partículas cai sensivelmente após atingir um L_r na ordem de 20 e manifesta ganho insignificante com L_r maior do que 40. Desta maneira, o autor recomenda valores de L_r abaixo de 40 e

preferencialmente em torno de 20. Ferreira Filho (2017) corrobora, ao afirmar que não se justifica adotar valores de L_r maiores que 40, pois o benefício no dimensionamento (de obter menores áreas superficiais no decantador) se torna insignificante, bem como, recomenda adotar valores sempre superiores a 20. Ademais, Richter (2009) cita que excelentes projetos que utilizaram placas planas paralelas adotaram valores de L_r entre 20 e 24.

A influência do comprimento relativo (L_r) e do ângulo de inclinação dos elementos de sedimentação em relação a horizontal (θ) na eficiência do decantador tubular é demonstrada nos gráficos das Figura 13 e Figura 14.

Figura 13 – Relação do ângulo de inclinação da placa ou duto e a eficiência de sedimentação.



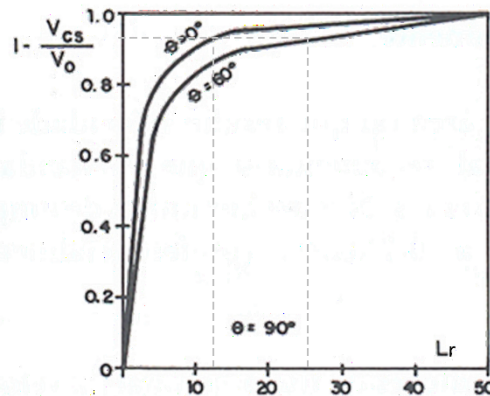
Legenda: $(1 - v_{cs}/v_0)$ = eficiência de remoção de sólidos; θ = ângulo da placa ou duto; L_r = comprimento relativo. Fonte: Richter (2009)

Ao analisar o gráfico da Figura 13, constata-se que a eficiência de remoção de sólidos é máxima para um posicionamento do elemento de sedimentação com um ângulo igual a 0° em relação ao plano horizontal. Comparando os ângulos 0° e 60° no gráfico, para um $L_r = 5$, a eficiência seria 80% e 70%, respectivamente; já para um $L_r = 20$, as eficiências seriam cerca de 95% e 90%, respectivamente. Assim, para um comprimento relativo maior, a diferença entre as eficiências diminui, porém ainda existe, importando o ângulo.

Ainda na Figura 13, agora analisando a eficiência para um mesmo ângulo, o comprimento relativo maior é mais eficiente. Por exemplo, no ângulo 60°, a eficiência equivalente para $L_r = 5$ é de 70%, enquanto que para $L_r = 20$ corresponde a 90%.

O gráfico da Figura 14 mostra essa relação entre a eficiência de sedimentação e o comprimento relativo, de forma análoga ao ângulo dos módulos.

Figura 14 – Relação do comprimento relativo e a eficiência de sedimentação.



Legenda: $(1 - v_{cs}/v_0)$ = eficiência de remoção de sólidos; θ = ângulo da placa ou duto; L_r = comprimento relativo. Fonte: Richter (2009)

Na Figura 14, novamente é mostrado que quanto maior o L_r , maior a eficiência de sedimentação. Salienta-se que a curva varia de acordo com a inclinação da lamela (placa ou duto). Vale ressaltar que para comprimentos relativos inferiores a 10, a curva apresenta maior diferença de eficiência em relação ao ângulo do módulo tubular.

A escolha da inclinação se mostra mais determinante principalmente para eficiências elevadas. Como por exemplo, para uma eficiência de 95%, um $L_r \approx 12$ já bastaria para inclinação 0° , porém, seria necessário um $L_r \approx 25$ para inclinação de 60° .

Comprimentos relativos menores significam decantadores com menores áreas superficiais. Tal mudança é um fator importante para promover ETAs mais compactas e mais econômicas, tratando a água com eficiência similar ou maior, em áreas menores.

A maior eficiência em decantadores de alta taxa ocorre devido à pequena distância vertical que o floco precisa percorrer, o que possibilita uma diminuição da velocidade de sedimentação crítica (v_{cs}) considerando mesma velocidade de escoamento (v_0), ou seja, que é possível remover partículas de menor diâmetro. Também permite um aumento da v_0 mantendo a v_{cs} característica da partícula que já era comumente removida.

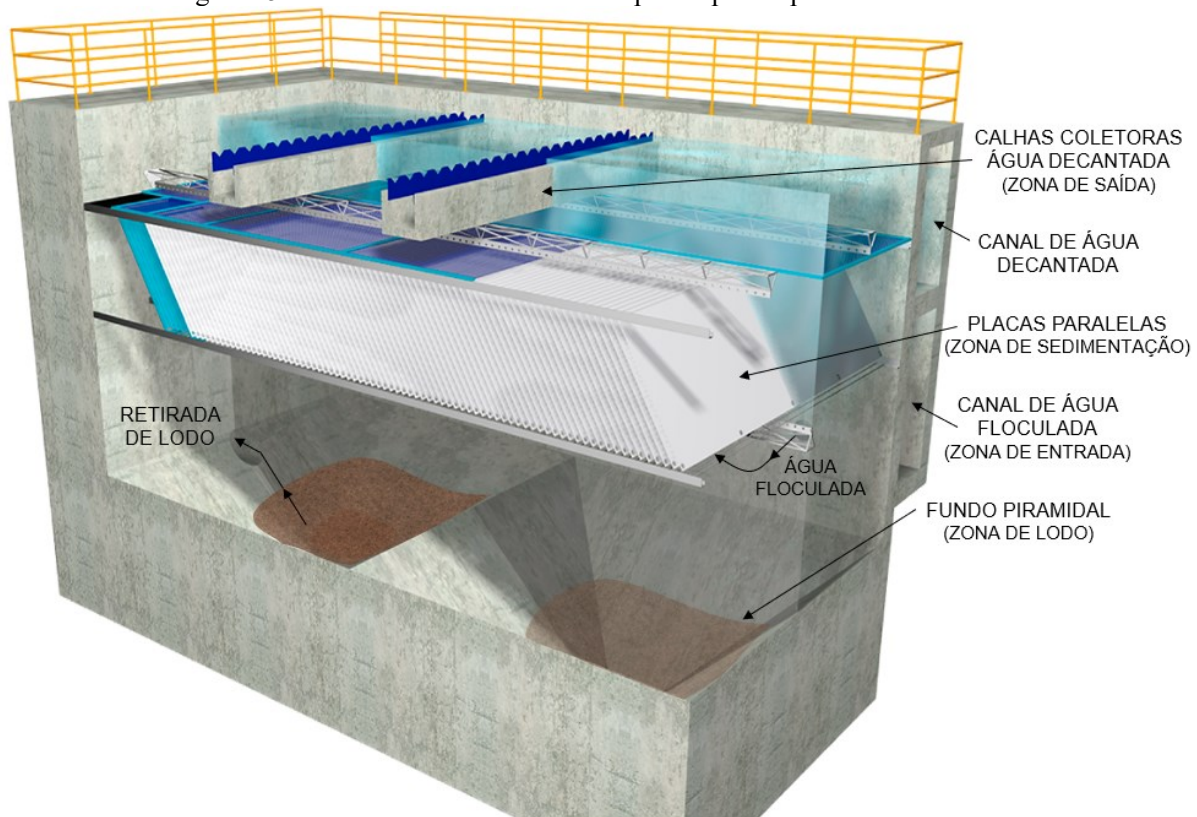
As aplicações melhor-sucedidas dos decantadores com tubos posicionados na horizontal foram em sistemas de tratamento de água onde os decantadores eram instalados anteriormente aos filtros e cuja remoção de lodo ocorria com auxílio da retrolavagem dos filtros (REED; BUZZELL; BUDA, 1973). Entretanto, por questões operacionais, começou a ser prevista uma inclinação dos elementos de sedimentação, que forme um ângulo específico com o plano horizontal (entre 55° e 60°) e permita uma remoção contínua de lodo (FERREIRA FILHO, 2017).

Demir (1995), realizou experimentos posicionando placas de sedimentação em diferentes ângulos de inclinação, variando de 30° a 80° em relação à horizontal. Para tratar

uma água bruta com turbidez de 70 a 80 uT, utilizou placas espaçadas a 5 cm, testando uma mesma velocidade longitudinal (de 1,5 m/h), o autor obteve uma eficiência variando entre 70 e 80%, sendo a maior eficiência referente ao ângulo 55°. As inclinações de 30° e 40° apresentaram eficiência de 73 e 78%, respectivamente, indicando que acima de 40% já há um ganho significativo de eficiência com a autolimpeza. Porém, o estudo demonstrou que uma inclinação acima de 70° promove diminuição da eficiência novamente.

Na Figura 15 é apresentado um layout exemplificando um decantador de alta taxa de placas paralelas inclinadas, mais utilizado atualmente por propiciar a autolimpeza.

Figura 15 – Decantador de alta taxa com placas planas paralelas inclinadas.



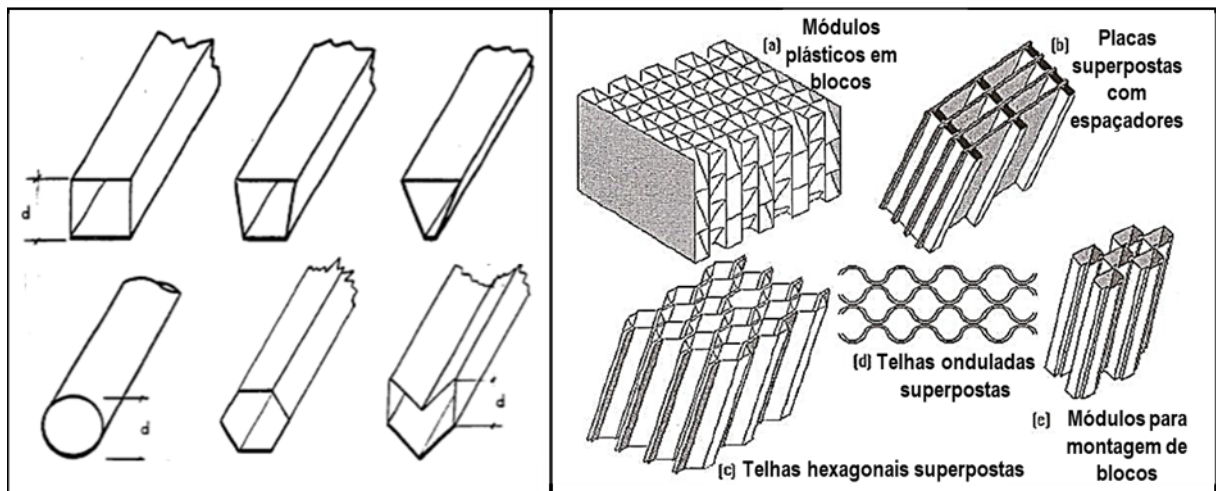
Fonte: Adaptado de www.dalntax.com.br/

Segundo Di Bernardo (1993), os módulos podem ser constituídos de dutos com formatos de seção variados, como circular, quadrada, retangular, hexagonal, trapezoidal, em “V”, entre outros, como pode se observa na Figura 16. Além disso, os canais formados pelos módulos ainda podem alternar a direção entre uma linha e outra, o que fornece mais sustentação ao módulo. O uso de qualquer tipo de módulo depende essencialmente da característica da água floculada e da geometria dos dutos. No mercado brasileiro há diversos fabricantes de módulos tubulares com diferentes geometrias (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017), como é possível observar na Figura 16.

Bhole et. al (1996) testaram dutos modificados, introduzindo repartições internas, em comparação aos dutos de sedimentação convencionais, ambos com 60° de inclinação em relação à horizontal. Foram investigados quatro formatos da seção dos dutos: circular, quadrado, hexagonal e “em viga”, todos com mesma área da seção transversal (25 cm^2). A eficiência de remoção dos decantadores com tubos convencionais variou de 75 a 89%, após seis horas de observação, enquanto a eficiência dos decantadores de tubos modificados variou de 82 a 97%, para condições idênticas.

Como cada duto atua como um pequeno tanque de decantação, a capacidade de tratamento é proporcional ao número de tubos de sedimentação.

Figura 16 – Vários formatos de dutos e tipos de módulos tubulares.



Fonte: Fadel (1985) e Vianna (2002).

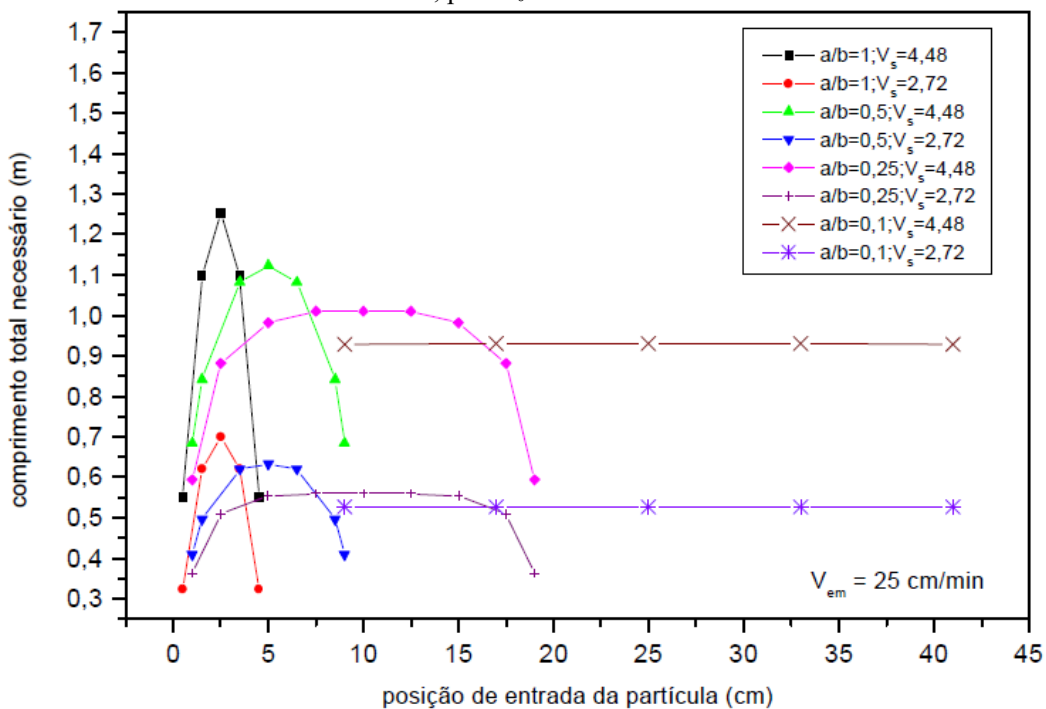
Esses módulos são arranjos de dutos, de variados formatos e tamanhos de seção. Shevidi et al. (2011) e Faraji et. al (2013) propuseram novos arranjos de decantadores em série com tubos de sedimentação inclinados para o tratamento de efluentes, utilizando dois estágios de remoção de turbidez. O primeiro com tubos de diâmetros comumente observados (50 mm) e o segundo de diâmetros muito pequenos (12 mm), a fim de obter maior eficiência.

Segundo Sarkar, Kamilya e Mal (2007), a análise dimensional é um dos métodos que pode ser usado para minimizar o tempo e as despesas dispensados em experimentos e, ainda assim, obter informações valiosas. Diversos estudos, como por exemplo o de Tarpagkou e Pantokratoras (2014), e de Imam et. al (1983), aplicam a modelagem matemática para prever a trajetória da partícula nos elementos de sedimentação, mas somente pode ser realizada para partículas discretas. Quanto maior a concentração de partículas, maior a interferência de a mesma ser discreta ou flocculenta na modelagem.

No gráfico da Figura 17, tem-se o comprimento necessário para sedimentação das partículas discretas em função da posição em que entram no duto retangular inclinado com a horizontal. Fica claro no gráfico que, quando a partícula entra na aresta superior e no centro da seção transversal dos dutos, se necessita de um comprimento maior do duto para a remoção da partícula (ALCÓCER; DI BERNARDO, 2001). Sendo assim, essa posição de entrada do sólido é considerada a mais crítica e desfavorável para a sedimentação.

Também pode-se inferir do mesmo gráfico (Figura 17) que a utilização de placas paralelas é mais eficiente do que módulos de sedimentação com seção retangular ou quadrada, pois exige um comprimento menor para sedimentar os flocos; para uma mesma velocidade longitudinal de 25 cm/min. Isso pode ser explicado pelo atrito do fluxo de água nas paredes do elemento de sedimentação. Quanto mais próximo do formato quadrado, mais o atrito irá influenciar para determinada vazão, fazendo com que o perfil de velocidade apresente um pico mais acentuado no centro e, nas paredes, uma velocidade igual à zero.

Figura 17 – Comprimento necessário de sedimentação em função da posição da partícula na entrada do duto, para $v_0 = 25$ cm/min.



Legenda: a/b: relação entre altura e largura da seção do módulo de sedimentação.

Fonte: Alcócer e Di Bernardo (2001)

Analisando a relação “a/b” entre altura (a) e largura (b) da seção transversal do módulo, quanto maior b e menor for essa relação a/b, menor o comprimento necessário do duto para sedimentar a mesma partícula, para mesma velocidade média de escoamento considerada.

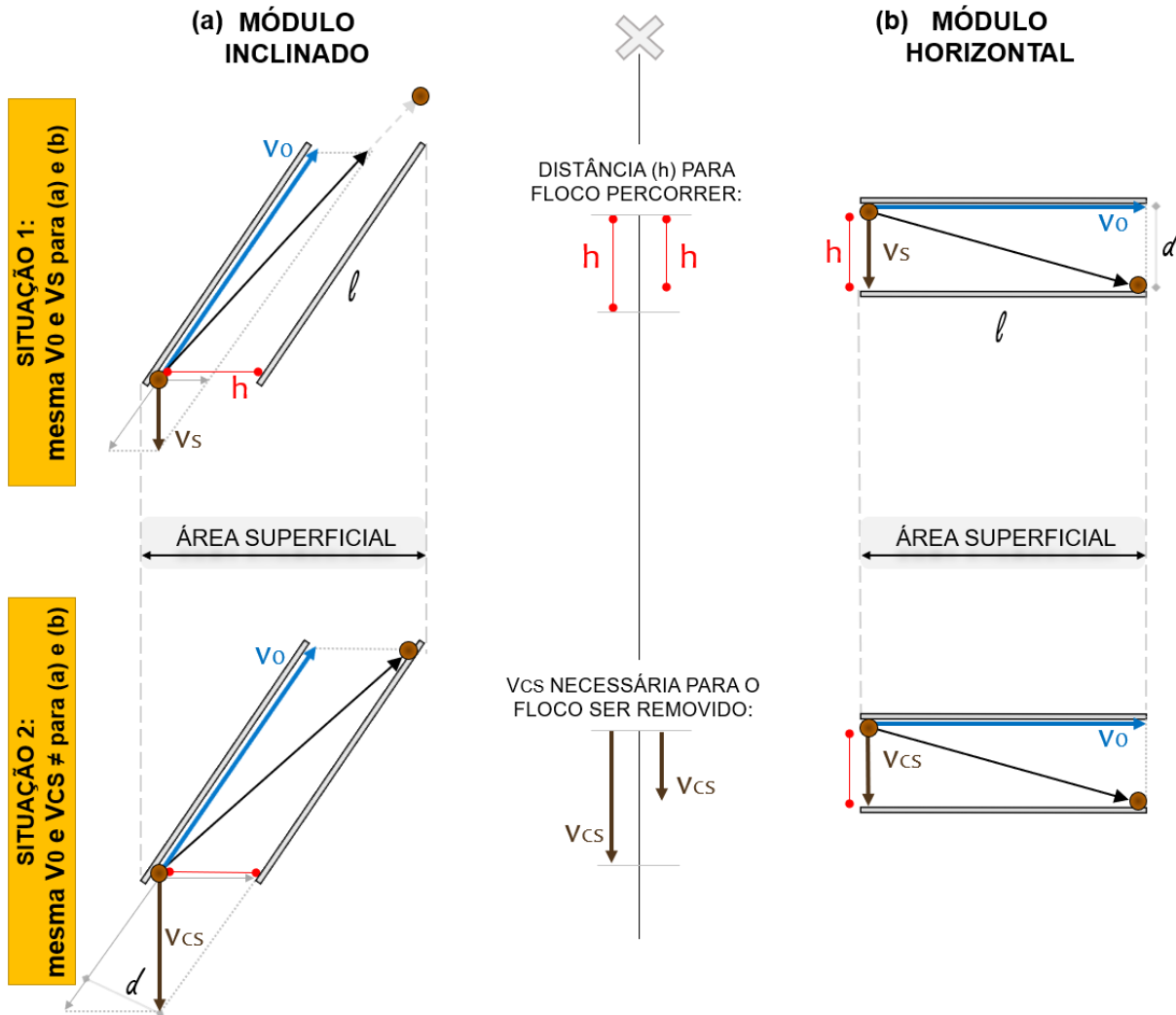
Considerando o mesmo comprimento relativo, a velocidade de sedimentação necessária para que a partícula sedimente e seja removida reduz com a diminuição da relação a/b , ou seja, para se obter o mesmo desempenho em um duto quadrado e de placas paralelas, a velocidade de sedimentação da partícula no duto quadrado deverá ser maior para o de placas planas paralelas (ALCÓCER, DI BERNARDO, 2001).

3.4.2.1 *Decantador tubular horizontal (0°) x decantador com placas ou módulos tubulares inclinados entre 55° e 65°*

A fim de discorrer mais sobre as vantagens de posicionar os dutos e placas paralelos ao plano horizontal ao invés de inclinado como mais usados atualmente, neste tópico buscou-se esclarecer as diferenças entre os processos inerentes aos decantadores tubulares horizontais e decantadores de alta taxa com placas ou módulos tubulares inclinados.

Na Figura 18 é feita uma comparação entre o elemento de sedimentação inclinado a 60° (a) e na horizontal (b), ambos de mesmo comprimento (l) e mesmo espaçamento (d) e que ocupam mesma área superficial (vista em planta). Comparou-se em relação às trajetórias dos flocos que entram na situação crítica no módulo, isto é, o floco entra na posição mais distante para sedimentar. A confrontação foi realizada para situação de mesma velocidade longitudinal e mesma velocidade de sedimentação (1) e para situação com mesma velocidade longitudinal, porém velocidade crítica de sedimentação, necessária para remover a partícula (2).

Figura 18 – Comparação das trajetórias das partículas em posição mais crítica no interior de módulos de sedimentação inclinados (a) e horizontais (b).



Legenda: l = comprimento da placa ou duto; d = espaçamento perpendicular entre placas ou dutos; h = distância para floco percorrer e ser removido; v_0 = velocidade de escoamento longitudinal; v_s = velocidade de sedimentação; v_{cs} = velocidade crítica de sedimentação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Situação 1 (Figura 18), considera-se uma mesma condição de água floculada, onde os flocos que vão percorrer o interior dos módulos apresentam mesma velocidade de sedimentação (v_s) característica e são submetidos a uma mesma velocidade de escoamento (v_0). Nesta situação, a trajetória do floco em (a) não atinge a outra superfície de sedimentação, significando que o floco escapará para a zona de saída; já em (b), o floco atinge a outra superfície ainda na zona de sedimentação, exatamente antes de escapar.

Na Situação 2 (Figura 18), foram empregadas velocidades de escoamento (v_0) iguais nos módulos, porém as velocidades de sedimentação foram as velocidades crítica de sedimentação (v_{cs}), necessárias para remover do floco logo antes de chegar à zona de saída. A v_{cs} necessária na situação (a) foi muito superior à situação (b), ou seja, seria necessário um

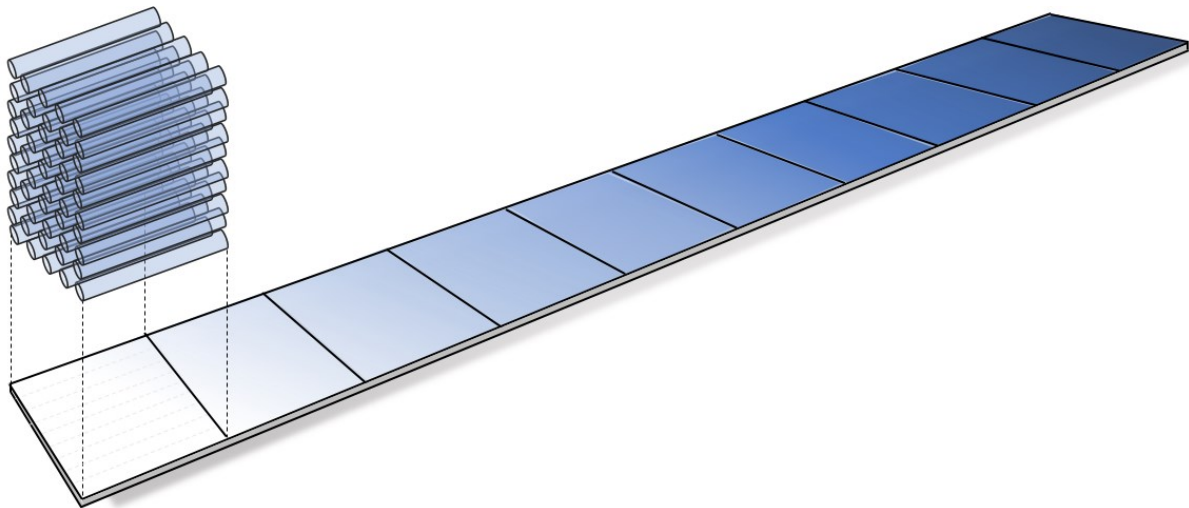
floco mais pesado (maior diâmetro) ou um maior comprimento do módulo para remoção da partícula.

Dessa forma, o módulo na horizontal é mais eficiente para mesma área superficial de sedimentação e proporciona menor distância (h) para o floco percorrer até ser removido. Além disso, ocupa menor altura total no decantador, justamente por não ter esse ângulo de inclinação.

A Figura 19, analogamente à Figura 10, mostra a vantagem dos decantadores de alta taxa perante aos convencionais horizontais. Porém, no caso, também ilustra a vantagem do decantador do tipo tubular horizontal em relação ao de placas paralelas inclinadas. Devido aos elementos de sedimentação na horizontal serem mais eficientes, os mesmos podem ocupar menor área de sedimentação (que quando inclinados).

A área superficial de uma camada de tubos horizontais representa um quadrado no chão, assim como, 10 camadas de tubos sobrepostos e espaçados ocupam a mesma área superficial (Figura 19). Com isso, a área de contato disponível para os flocos é equivalente aos 10 quadrados ao longo do chão. O decantador do tipo convencional, para equivaler a eficiência, precisaria da área superficial de todos os quadrados, isto é, uma área superficial 10 vezes maior do que a ocupada pelos módulos tubulares na horizontal (decantador de alta taxa).

Figura 19 – Redução da área superficial pelo aumento da área de contato para os flocos sedimentarem com o uso de módulos na horizontal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Até o momento, nesse tópico, foram apenas ressaltadas as vantagens dos elementos de sedimentação posicionados na horizontal. Entretanto, ao comparar os tubos posicionados na horizontal e inclinados, Fadel (1985) descreveu as desvantagens decorrentes do acúmulo de lodo no interior dos tubos horizontais. O autor destacou o fato de os mesmos não

permitirem condições operacionais estacionárias, isto é, o acúmulo de lodo, que ocorre entre uma lavagem e outra, ocupa parte do volume do duto ao longo do tempo, aumentando a velocidade do fluxo.

Sem uma constância na distância vertical e longitudinal necessária a ser percorrida pelos flocos devido à variação da velocidade de fluxo, os projetistas subestimam o diâmetro e comprimento necessários para esses tubos sem autolimpeza. Fadel (1985) ainda afirmou que se a elaboração do projeto incluísse o volume de armazenamento necessário nesses tubos essencialmente horizontais, os mesmos apresentariam desempenho equivalente ao dos tubos com inclinação acentuada. Dessa forma, sem o fator autolimpeza, os dutos horizontais não apresentam vantagem em relação aos inclinados.

3.5 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS DECANTADORES NO TRATAMENTO DE ÁGUA

Desde os primórdios em que a humanidade começou a armazenar água para uso próprio, já se praticava um dos processos mais simples para remoção de partículas suspensas da água: a decantação. Ao deixar uma quantidade de água por longo período em repouso, percebiam que sua qualidade melhorava. Assim, existiram vários exemplos de reservatórios ou cisternas de água que funcionavam como tanques de sedimentação há centenas de anos antes de Cristo, embora não tenham sido construídos exatamente com este propósito (AWWA, 2002).

Apesar de a técnica ser muito antiga devido à circunstância natural do fenômeno, os estudos científicos sobre a prática utilizada para o tratamento da água surgiram apenas no início do século XX (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). De modo intuitivo, mesmo que sem pesquisas sobre o assunto, a partir do século XIX já surgiram os primeiros decantadores para o tratamento de água, que nada mais eram que grandes tanques onde a água turva ficava repousando por longos tempos de detenção (de 2 a 4 h). Algumas vantagens destes decantadores de fluxo horizontal são sua simplicidade, eficiência elevada e baixa sensibilidade a sobrecargas, o que faz ainda serem utilizados atualmente.

O lodo que acumulava no fundo desses tanques era de difícil remoção (ARBOLEDA, 2000). Inicialmente, os decantadores tinham que ser completamente esvaziados para proceder com uma limpeza manual, como mostra a Figura 20. Essa limpeza exigia tempo, mão de obra, interrupção do funcionamento do decantador, e ainda desperdiçava muita água. Com a pesquisa voltada para aprimorar o processo, mecanismos para remoção de lodo foram criados,

surgindo os raspadores mecânicos. Desse modo, os decantadores convencionais horizontais foram empregados largamente no tratamento de água por um longo período (RICHTER, 2009). Mesmo que menos aplicados, seu uso perdura até hoje, havendo avanços tecnológicos focados principalmente em mecanismos de limpeza e dispositivos de entrada e saída.

Esses decantadores ocupavam áreas enormes, pois demorava muito para que os flocos em situação mais crítica, isto é, os que entram na parte superior do decantador, percorressem a profundidade de 3 a 5 m até chegar à zona de lodo. A construção desses tanques tão comuns chegava a representar 60 a 70 % da área das unidades integrantes da estação de tratamento (LIBÂNIO, 2010).

Figura 20 – Lavagem de decantador convencional horizontal.



Fonte: www.biosis.eco.br

Em 1904, Hazen revolucionou o entendimento sobre decantadores, com a teoria clássica de sedimentação em bandejas rasas. O autor foi um dos pesquisadores pioneiros a discorrer sobre decantadores convencionais de escoamento horizontal (SOARES; SCHULZ; ROMA; DI BERNARDO, 1997). O mesmo almejava o aumento da taxa de escoamento superficial ao aumentar a superfície de contato para os sólidos sedimentarem em mesma área vista em planta, conseguindo aumentar a vazão por área em planta.

A partir de seus estudos e observações, Hazen (1904) concluiu que a ação de um tanque de sedimentação depende de sua área superficial e não de sua profundidade ou tempo de detenção (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Uma subdivisão horizontal

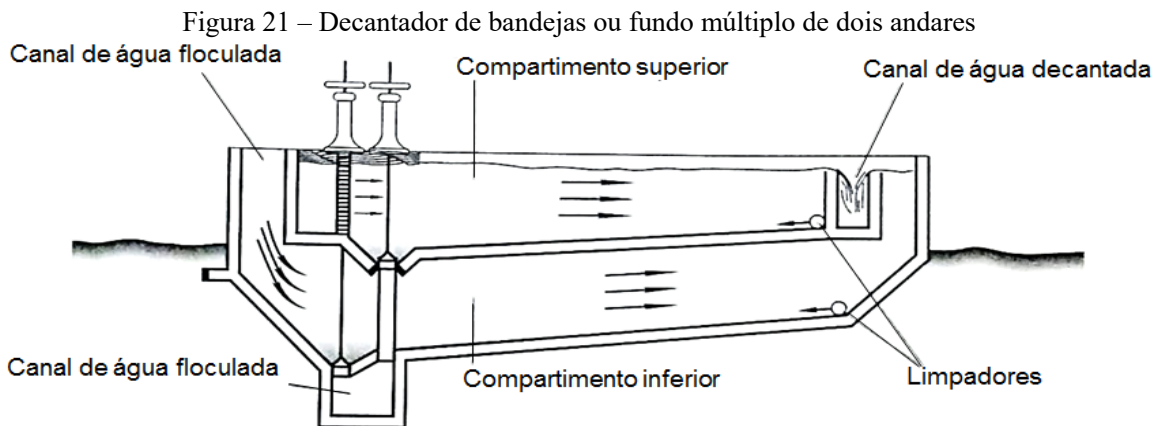
produziria uma superfície dupla para receber sedimentos, em lugar de uma única, e duplicaria a capacidade de trabalho. Se o tanque de sedimentação pudesse ser cortado longitudinalmente por uma série de fundos intermediários, o aumento de eficiência seria significativo (RICHTER, 2009).

Hazen (1904) sugeriu fazer vários andares de lajes rasas com profundidade aproximada de 1 pol (25,4 mm) dentro de um tanque. Dessa maneira, o tempo médio de detenção das partículas poderia ser de alguns minutos ao invés de algumas horas, visto que a distância de deslocamento vertical para uma partícula em sedimentação é muito pequena nessa situação (CULP, 2014).

O raciocínio foi o seguinte: se uma partícula que se move a uma taxa de 1 pol/min requer 2 h para ser removida em um tanque de profundidade de 10 pés (3,0 m), a mesma levará apenas 1 min para sedimentar a profundidade de 1 pol. Como resultado, o tempo de detenção, o tamanho e o custo da etapa de sedimentação poderiam ser reduzidos drasticamente se profundidades muito rasas fossem usadas (CULP, 2014).

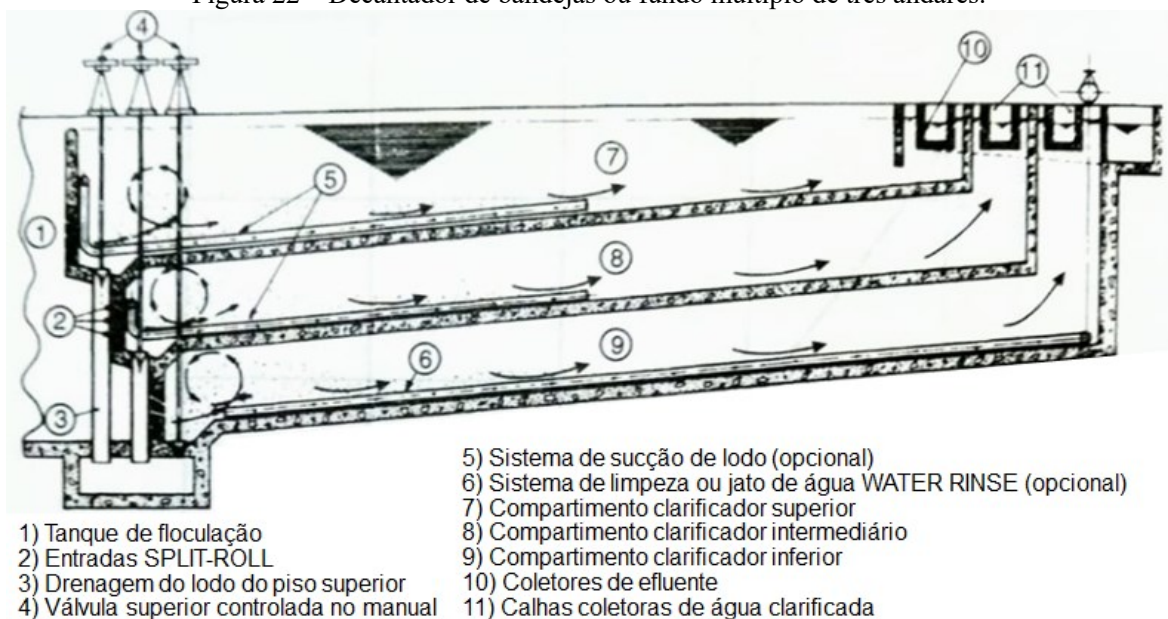
Hazen, em 1904, admitiu a dificuldade de limpeza na configuração que propôs, pois, com a proximidade das bandejas, a limpeza manual era praticamente impossível e os raspadores mecânicos não cabiam entre as bandejas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Diante desses impasses, os projetistas abandonaram a ideia de executar decantadores com fundos ou bandejas em grande número (RICHTER, 2009).

Devido à folga vertical necessária para os raspadores mecânicos, o melhor que Hazen pôde sugerir foi colocar uma bandeja horizontal na metade da profundidade de tanques de sedimentação de 3 a 5 m, ficando com dois andares de 1,5 a 2,5 m de profundidade, e dobrando a capacidade (CULP, 2014). Assim, continuaram a ser construídos decantadores de fundos intermediários com dois ou três andares, conforme visualizado na Figura 21 e na Figura 22 (RICHTER, 2009). Exemplos típicos, citados por Richter e Azevedo Netto (1991), de ETAs que contenham decantador de bandejas são em Estocolmo (2 andares), Paris (3 andares) e Tóquio (3 andares). Exemplos no Brasil são a ETA de Itajaí (SC), Blumenau (SC) e Barra Mansa (RJ) com as bandejas feitas em madeira na horizontal e ligeiramente inclinadas para o centro do decantador.



Fonte: Richter (2009).

Figura 22 – Decantador de bandejas ou fundo múltiplo de três andares.



Fonte: traduzido de AWWA (2002), cortesia de Francia e Kubota Construção Co., Ltd, Tóquio, Japão.

Morrill, Dean, Orton e Ellms, em 1932, afirmaram que houve importantes progressos associados de uma forma ou de outra aos tanques de sedimentação, como a introdução da remoção mecânica de lodo. Entretanto, quanto à teoria da sedimentação, se impressionavam como os engenheiros praticamente não avançaram do ponto em que parou a publicação do artigo importante de Hazen em 1904.

Mais tarde, em 1946, Camp retomou os estudos de Hazen, desenvolvendo pesquisas mais detalhadas acerca da decantação. Camp (1946) sugeriu que os benefícios das profundidades de sedimentação rasas poderiam ser levados ainda mais longe, usando profundidades tão pequenas quanto 15 cm, mas essa era a profundidade mínima que ele acreditava ser compatível com raspadores mecânicos de lodo (CULP, 2014).

Camp (1946) desenvolveu a metodologia racional para analisar as características da sedimentabilidade de partículas flocculentas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Uma vez que nos decantadores reais (não ideais), as partículas são floculentas e podem se aglomerar durante a sedimentação, ocasionando uma velocidade de sedimentação crescente à medida que se aglomeram.

Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) lembram que, diferentemente do que Hazen afirmou, não se pode assegurar que a eficiência de remoção de partículas depende da profundidade e do tempo de detenção para decantadores não ideais. Mas que, para suspensões de partículas floculentas, a área superficial e a taxa de escoamento superficial são parâmetros mais importantes que a profundidade e o tempo médio de detenção.

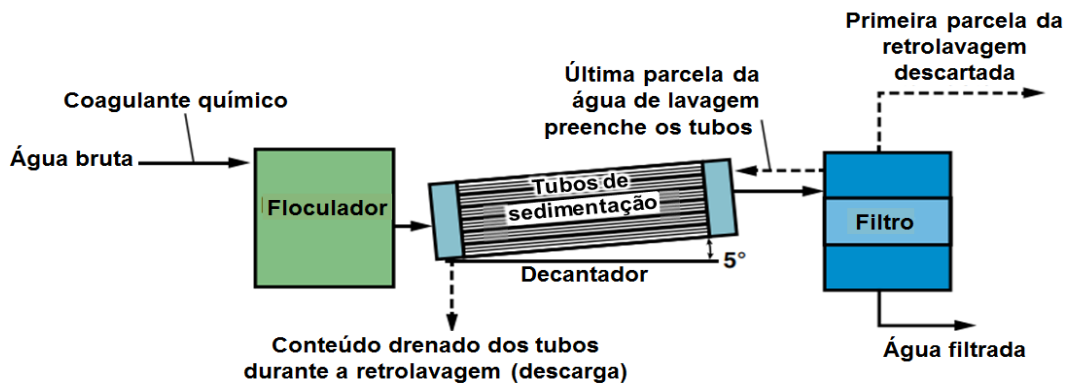
Com o passar dos anos, muitas tentativas foram feitas para desenvolver uma tecnologia prática de aplicação da teoria de Hazen, porém nunca tiveram sucesso. Dois grandes problemas impediram o progresso: o custo de construção para a instalação de um grande número de bandejas rasas em um tanque; e o desenvolvimento de uma técnica eficiente para a remoção de lodo acumulado (instalação e manutenção de raspadores). Além disso, descobriu-se que a distribuição do fluxo em múltiplas camadas não conseguia ser uniforme e levava a condições hidráulicas instáveis (REED; BUZZELL; BUDA, 1973).

Somente após a metade do século XX, voltou-se a estudar o assunto de ampliar a capacidade ou taxa de escoamento superficial dos decantadores. Em 1965, uma pequena companhia desenvolvedora de inovações no tratamento de água, chamada *Neptune Microfloc* (nos EUA), realizou um grande feito. Dois engenheiros desta companhia, Hansen e Culp foram desafiados a criar um decantador com tubos na horizontal capaz de efetuar a limpeza do lodo acumulado sem a necessidade de equipamentos mecânicos (CULP, 2014).

O decantador de 1965 de Hansen e Culp, por possuir elevada área de contato para os flocos, conseguia diminuir o tempo de detenção de horas para apenas 5 min. O mesmo era constituído de dutos plásticos, obtidos de maneira pouco custosa, colocados a um ângulo de inclinação de 5° em relação a horizontal. Os tubos em tal conceito são inclinados ligeiramente para garantir uma drenagem positiva no ciclo de limpeza (REED; BUZZELL; BUDA, 1973).

Em 1967, Hansen e Culp publicaram um artigo apresentando o mais recente decantador tubular horizontal, ilustrado na Figura 23. O decantador proposto era seguido da etapa de filtração, como em estações de tratamento de água convencionais. Dado que os filtros periodicamente são limpos com a retrolavagem do meio filtrante, os autores resolveram aproveitar esse fluxo de água para auxiliar na remoção do lodo acumulado no fundo dos tubos do decantador. Desse modo, o lodo podia ser removido drenando o tanque de sedimentação durante cada retrolavagem dos filtros, encaminhando o efluente da lavagem através dos tubos.

Figura 23 – Decantador tubular essencialmente horizontal.



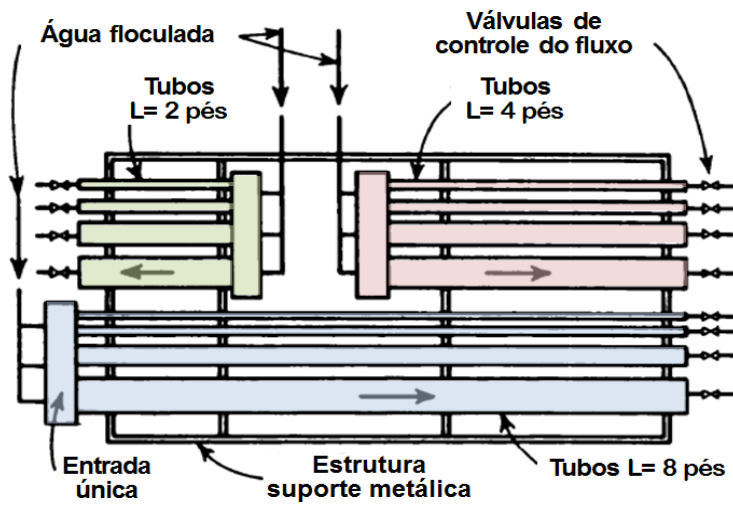
Fonte: imagem traduzida de Hansen e Culp (1967).

Como o volume de água utilizado para retrolavagem do filtro excedia o volume necessário para lavar o lodo acumulado em tal decantador, já se aproveitava para preenchê-lo de água de lavagem e então prosseguir com o tratamento. Dessa forma, evitava maiores desperdícios de água na estação (CULP, 2014).

Anteriormente, foram realizados testes preliminares em escala piloto com diferentes diâmetros e comprimentos de tubos, para diferentes taxas de escoamento superficial e qualidades de água bruta. Rapidamente, esses testes demonstraram que os tubos na horizontal eram dispositivos de sedimentação eficientes (HANSEN e CULP, 1967). O desenho esquemático do piloto é mostrado na Figura 24.

Nesse sistema piloto, Hansen e Culp (1967) selecionaram três comprimentos de tubos diferentes e, para cada comprimento, testaram quatro diâmetros distintos. Em todos esses tubos, aplicou-se três taxas de escoamento superficial, em momentos diferentes, e, por sua vez, durante a operação de cada uma, testaram três doses de polímeros diferentes na floculação. As condições e parâmetros são apresentados na Tabela 2. Em todos os testes, a dosagem de alumínio foi 100 mg/L e o tempo de floculação foi igual a 20 min.

Figura 24 – Desenho esquemático do sistema piloto usado para avaliar o efeito do diâmetro e comprimento do tubo no decantador tubular horizontal (vista em planta).



Legenda: L= comprimento do tubo

Fonte: imagem traduzida de Hansen e Culp (1967).

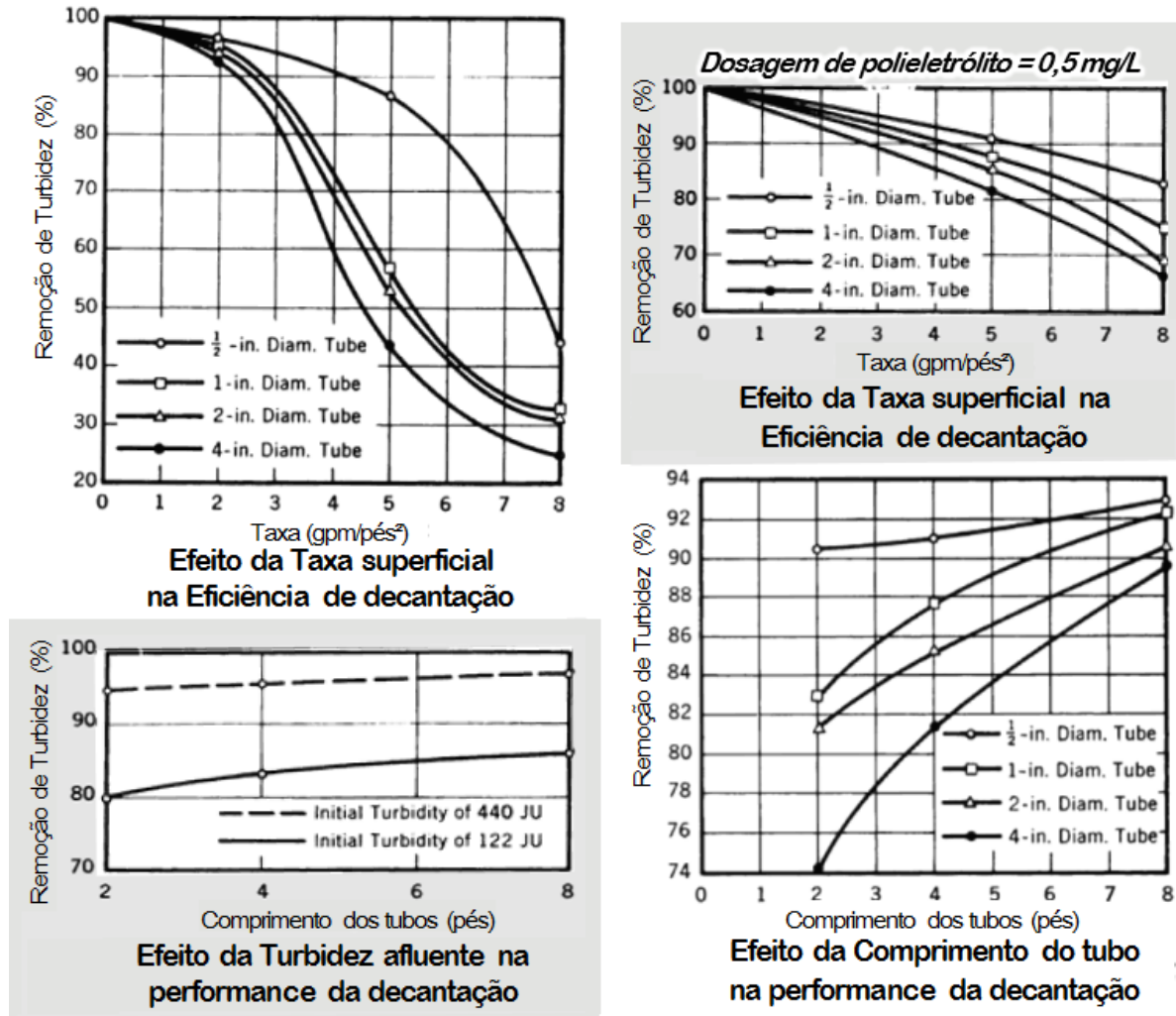
Tabela 2 – Valores testados para as diferentes condições experimentais.

Turbidez água bruta sintética (NTU)	Dosagem de polieletrólito (mg/L)	Taxas de escoamento superficial ($m^3/m^2.d.$)	Comprimentos dos tubos horizontais (m)	Diâmetros dos tubos horizontais (mm)
150	Ausente	117	0,6	12,7
450	0,2	293	1,2	25,4
	0,5	470	2,4	50,8
				101,6

Obs.: parâmetros de Hansen e Culp (1967) compilados e convertidos para o Sistema Internacional de Unidades.

Alguns resultados de Hansen e Culp (1967) estão expressos nos gráficos da Figura

Figura 25 – Gráficos demonstrando o efeito da taxa superficial, dosagem de polieletrólito, turbidez afluente e comprimento e diâmetro do tubo na eficiência da decantação.



Fonte: traduzido de Hansen e Culp (1967).

Hansen e Culp (1967) concluíram que o processo de sedimentação de tubos permite que sejam aplicadas de maneira prática as vantagens reconhecidas da sedimentação em profundidade rasa. Os autores ainda destacaram as seguintes relações entre os parâmetros e a eficiência da decantação para as condições testadas, as quais são possíveis de serem verificadas avaliando os gráficos da Figura 25:

- quanto maior a turbidez da água bruta, maior a eficiência;
- quanto maior a dosagem de polieletrólito, maior a eficiência;
- quanto maior o comprimento do tubo de sedimentação, maior a eficiência;
- quanto menor o diâmetro do tubo de sedimentação, maior a eficiência;
- quanto menor a taxa ou velocidade longitudinal, maior a eficiência.

Além da escala piloto, Hansen e Culp (1967) e Culp, Hansen e Richardson (1968) também construíram uma unidade maior (com a configuração ilustrada na Figura 23), usada

em campo para avaliar o processo de decantação tubular horizontal sob uma variedade de condições de operação.

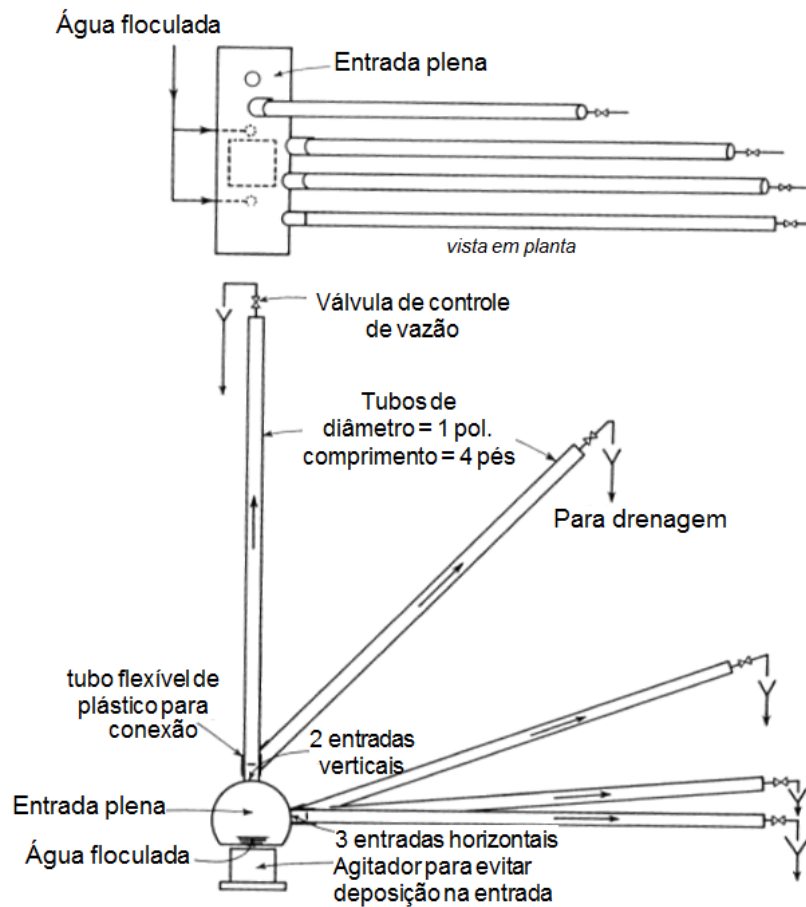
Essas unidades de floculação, decantação tubular horizontal e filtração foram transportadas para vários locais onde vários tipos de problemas de tratamento de água poderiam ser avaliados. Assim, foram testados diversos valores de turbidez em mananciais, de 0,2 a 30 uT. O protótipo de campo proporcionou resultados tão promissores, que os autores começaram a vender pacotes completos de estações de tratamento de água em escala real (CULP; HANSEN; RICHARDSON, 1968).

O decantador tubular horizontal foi um sucesso, sendo implantadas mais de 700 estações de tratamento de água com a tecnologia (WESTECH, 2014). Além disso, estações de tratamento de esgoto também aplicavam esses decantadores para o tratamento terciário (CULP, 2014).

Mesmo com os decantadores tubulares horizontais vendendo bem, Hansen e Culp quiseram ir além em 1968, e testaram diferentes inclinações dos tubos a fim de refinar o design do decantador. Tais ensaios foram feitos por meio do piloto da Figura 26. Segundo Culp (2014), eles não esperavam que fariam uma grande descoberta: que entre um ângulo de 45° a 60° com a horizontal, o lodo se movimentava para baixo, escoando nos dutos em sentido oposto ao da água, sem acumular, isto é, autolimpante; e que, ao mesmo tempo, tais ângulos não prejudicavam tanto a eficiência de decantação.

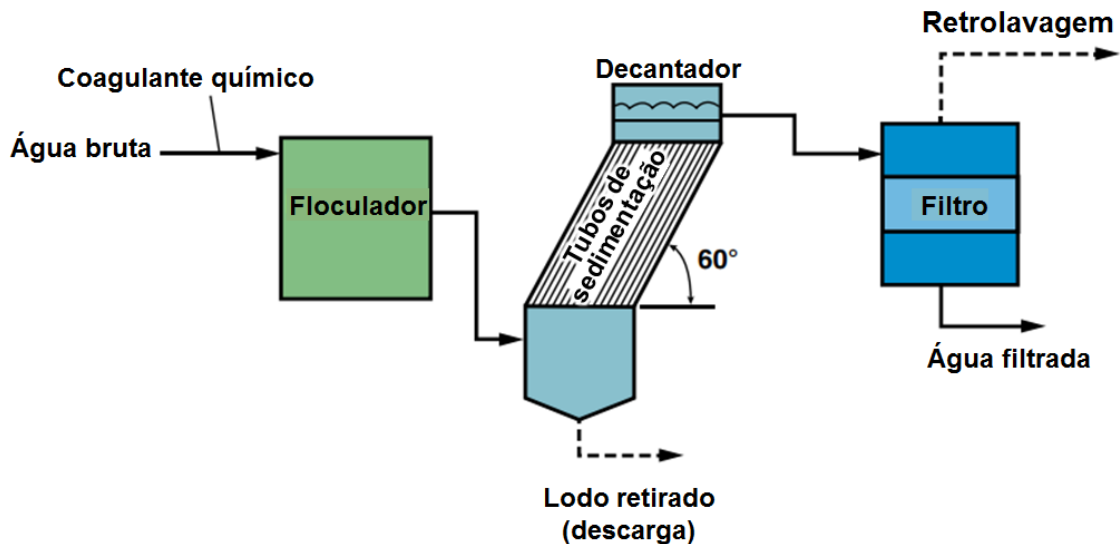
Embora Culp, Hansen e Richardson (1968) tenham observado uma diminuição da eficiência de sedimentação, quanto mais inclinavam os dutos em relação a horizontal, mais percebiam que havia uma limpeza contínua dos flocos, a qual melhorava a operação da estação de tratamento (até o ângulo de 60°). Agora o fluxo da estação poderia ser contínuo, como mostra a Figura 27, sem a parada do decantador para limpeza.

Figura 26 – Desenho esquemático do piloto para avaliar os efeitos da inclinação dos tubos.



Fonte: imagem traduzida de Culp, Hansen e Richardson (1968).

Figura 27 – Decantador tubular inclinado.



Fonte: imagem traduzida de Hansen e Culp (1967).

Como não ocorria mais a parada da ETA para a limpeza do decantador, a produção de água tratada pôde passar para muitos milhões de litros por dia (CULP, 2014). Nos testes descritos no trabalho de Culp, Hansen e Richardson (1968), uma planta de floculação,

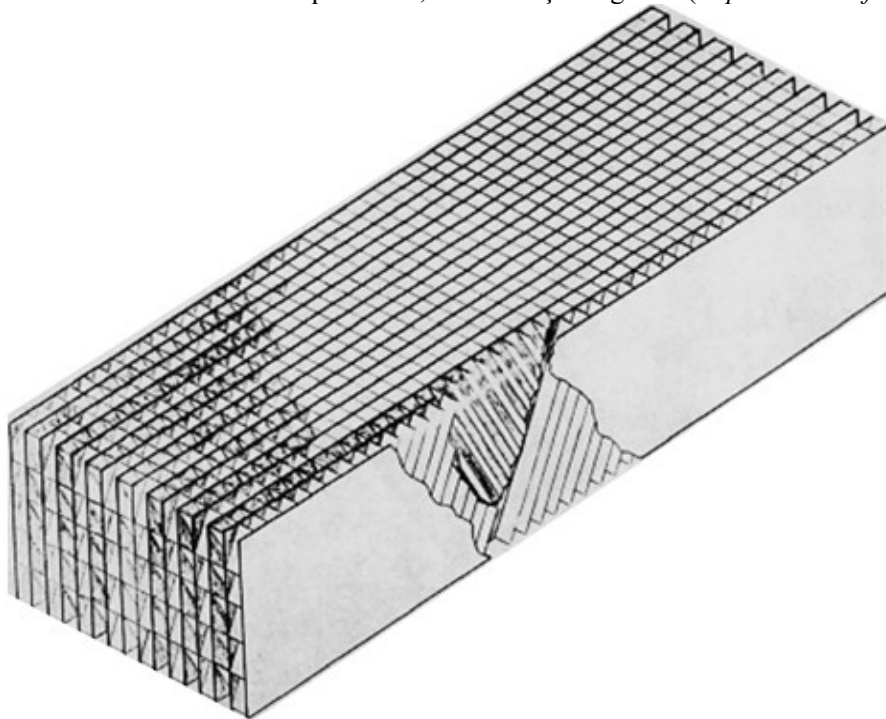
decantação tubular e filtração de dupla camada produziu água potável com turbidez de 0,1 uT a partir de uma turbidez de água bruta de 1000 uT, com um tempo total de detenção de 16 min.

O decantador tubular inclinado junto do filtro de dupla camada filtrante permite uma redução sensível dos custos e tamanho de novas estações de tratamento, devido ao aumento de eficiência e capacidade de tratamento (CULP; HANSEN; RICHARDSON, 1968).

Pretendendo afinar mais a tecnologia desenvolvida para decantadores tubulares, a *Neptune Microfloc* desenvolveu uma forma modular de tubos de inclinação acentuada. Segundo Culp (2014), os módulos de dutos eram fabricados de um termoplástico duro, resistente a impactos, e instalados a um ângulo de 60° entre folhas finas de policloreto de vinila (PVC). A alternância da direção de inclinação para cada fileira de dutos fez com que o módulo se tornasse mais firme, permitindo ser facilmente instalado em um tanque de sedimentação circular ou retangular (Figura 28).

O tamanho de um decantador poderia ser substancialmente reduzido incluindo os módulos tubulares no projeto, e a capacidade de um decantador existente poderia ser aumentada com a instalação dos mesmos (CULP, 2014).

Figura 28 – Módulos com tubos quadrados, de inclinação íngreme (*Neptune Microfloc*).



Fonte: Culp, Hansen e Richardson (1968).

Nos anos seguintes, trabalhos teóricos de Yao (1970 e 1973) mostraram que o escoamento de interesse prático é o laminar, por meio de uma abordagem analítica e rigorosa.

O autor concentrou atenção aos dutos circulares, canais rasos e placas planas paralelas. Yao (1970) definiu os valores do fator S, que demonstra a influência da geometria do duto ou placa na trajetória da partícula em seu interior. Os conceitos de Yao têm sido utilizados até atualmente, porém desagrada a muitos engenheiros o fator segurança ser exageradamente grande em suas simplificações, a ponto de ser desfavorável ao aspecto econômico (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

As aplicações práticas de Culp e colaboradores e os trabalhos teóricos de Yao promoveram uma verdadeira renovação da decantação no tratamento de água (RICHTER, 2009). Desde então, houve muitas variações de formas de tubos e de módulos tubulares, mas todos fundamentados nos conceitos básicos desenvolvidos em 1965.

Em 1971, a empresa Parkson introduziu o decantador Lamella®, que usava placas paralelas inclinadas espaçadas a 1,5 pol, ao invés de tubos inclinados (CULP, 2014). Assim, diversos engenheiros começaram a aplicar o decantador de placas planas paralelas pelo mundo, existindo vários materiais de fabricação das mesmas.

A primeira estação de tratamento de água que utilizou placas de cimento amianto foi no Equador, ainda em 1971 (RICHTER, 2009). Mais tarde, a utilização desse material foi proibida em diversos países, inclusive no Brasil, devido aos riscos oferecidos à saúde do consumidor.

Richter e Arboleda, em 1972, utilizaram madeira naval para fazer as placas. Em 1973, Contreras Pulido foi o primeiro a utilizar lâminas flexíveis de plástico como placas paralelas na decantação (RICHTER, 2009). A vantagem dessas lâminas ou lonas é a espessura ínfima da placa, que ocupam menos área em planta e auxilia no aumento da capacidade da unidade.

Além do fluxo vertical, os decantadores de placas paralelas inclinadas também foram desenvolvidos com fluxo horizontal. Richter e Schuchardt (1989) descreveram o caso da ETA de Toledo no Paraná (SC), a qual possuía decantador convencional horizontal e foi reformada com a colocação de placas paralelas (lonas plásticas) inclinadas 60°, porém mantendo o fluxo da água no sentido longitudinal. Eles relatam que isso possibilitou a vazão da ETA aumentar de 60 para 130 L/s, e ainda houve melhorias na qualidade da água decantada.

Tanto os decantadores de alta taxa com módulos tubulares e com placas paralelas inclinadas se tornaram amplamente aceitos e usados em todo o mundo, com milhares de instalações municipais de abastecimento público e industriais.

3.5.1 Nova Concepção da Conformação Interna de Decantador de Alta Taxa

Com a compreensão de que a ação de um decantador depende essencialmente da sua área superficial, optou-se por seguir a linha tecnológica e buscar inovar os decantadores do tipo tubular ou de alta taxa.

O novo decantador desenvolvido neste trabalho foi inspirado no decantador de alta taxa de módulos tubulares, porém diferentemente dos mais empregados atualmente (módulos inclinados) esse retorna a utilizar os dutos dispostos na horizontal (0°). A justificativa para buscar tal mudança é explicada pelo gráfico da eficiência do decantador *versus* à inclinação dos módulos, em que a eficiência é máxima para um ângulo igual à zero.

Para uma eficiência idêntica, o ângulo igual a 0° admite um comprimento relativo (L_r) menor, quando comparado a 60° , ou seja, os dutos dispostos na horizontal representam um decantador mais compacto do que quando inclinados, não deixando de ser menos eficiente.

O fato de o decantador com elementos tubulares na horizontal teoricamente ser mais eficiente e/ou mais compacto é reconhecido na literatura. Contudo, o mesmo entrou em desuso devido a um ponto prático crucial: a remoção de lodo gerado ser ineficaz (ou seja, devido à questão operacional). Desse modo, a grande contribuição deste trabalho é manter as características positivas do decantador horizontal tubular (alta eficiência), buscando solucionar seu ponto negativo ao propor uma concepção que promove a autolimpeza.

Em razão de o lodo acumular no interior dos tubos horizontais, surgiu a ideia de criar uma abertura ao longo do fundo dos mesmos, para que os flocos possam sair e não retornarem mais à água que está sendo clarificada, estabelecendo, assim, um mecanismo de autolimpeza. Espera-se que o floco que sair através dessa abertura percorra pelo entorno dos tubos, não retornando mais ao interior destes, e sedimente até a zona de lodo.

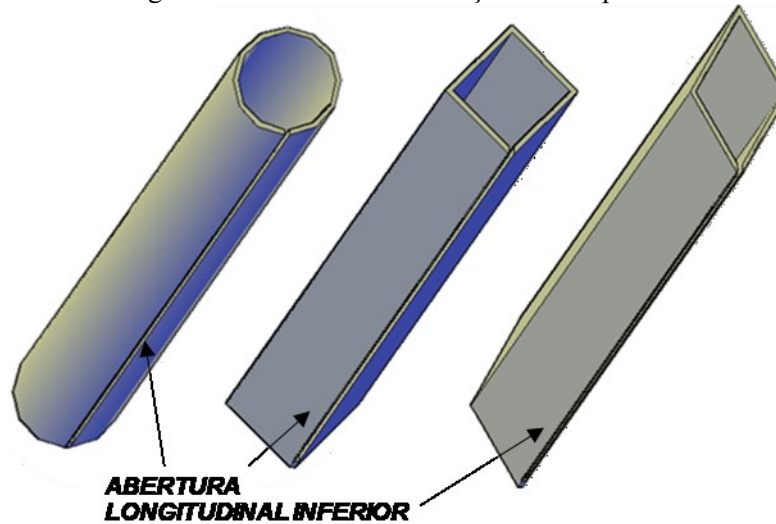
A invenção de uma abertura longitudinal inferior nos dutos horizontais foi idealizada pelo professor Maurício Luiz Sens em 2016, e agora está sendo colocada em prática. Visto que essa solução para autolimpeza é o cerne da inovação, decidiu-se nomear o decantador de “*MLSens*”. O decantador *MLSens* encontra-se em processo de patenteamento.

A grande vantagem da nova concepção é não necessitar de remoção manual ou mecânica do lodo quando os dutos estiverem posicionados na horizontal. Além disso, outra vantagem é que, diferentemente da maioria dos decantadores utilizados, as calhas de coleta de água decantada são os próprios dutos horizontais. À medida que os flocos vão saindo pela abertura, a água vai clarificando ao longo do comprimento do decantador. Por isso, é

importante atentar para a velocidade de sedimentação da partícula e para taxa de escoamento superficial que se quer aplicar no decantador, a fim de calcular o comprimento suficiente para que a água decantada seja de boa qualidade.

A Figura 29 demonstra uma vista debaixo de alguns formatos de dutos de sedimentação autolimpantes, com foco para a abertura longitudinal inferior.

Figura 29 – Duto de sedimentação autolimpante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia da pesquisa foi embasada na construção e operação de dois sistemas piloto em operação contínua. Os pilotos seguem o sistema de tratamento convencional, até a unidade da decantação, sendo o foco do estudo a decantação. Em se tratando de experimentos com partículas flocculentas, faz-se necessário anteriormente o condicionamento da água por coagulação e floculação. Antes disso, é preciso dispor de uma água bruta adequada para o tipo de tratamento, onde a unidade da decantação se faz presente.

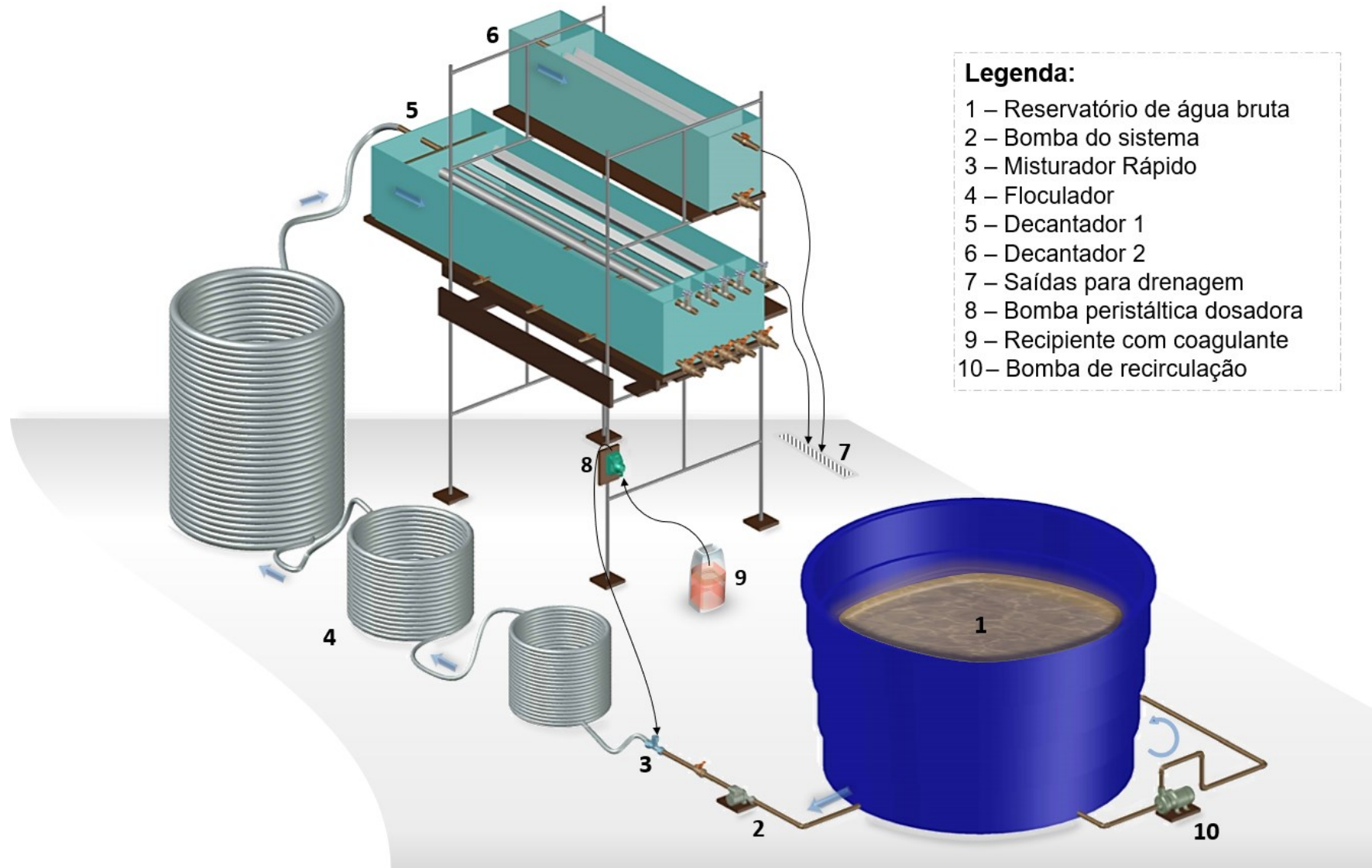
As investigações experimentais foram conduzidas no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOÁ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Nas Figuras 30 e 31, foram ilustrados desenhos esquemáticos dos sistemas piloto de tratamento. Nessas representações, há duas unidades de decantação: o Decantador 1, para testar diferentes geometrias da seção transversal dos dutos e as respectivas influencias no desempenho da unidade; e o Decantador 2, para verificar o desempenho de um arranjo de dutos.

Vale salientar que os dois sistemas pilotos foram operados em momentos diferentes, visto que foi construído apenas um misturador rápido e um floculador, projetados para a vazão de projeto de um decantador (1,9 L/min). Como os resultados entre ambos os pilotos são complementares e não podem ser diretamente comparáveis, a operação em períodos distintos (condições externas diferentes) não interferiu na análise dos resultados.

Figura 30 – Representação gráfica do sistema piloto como um todo.

Legenda:

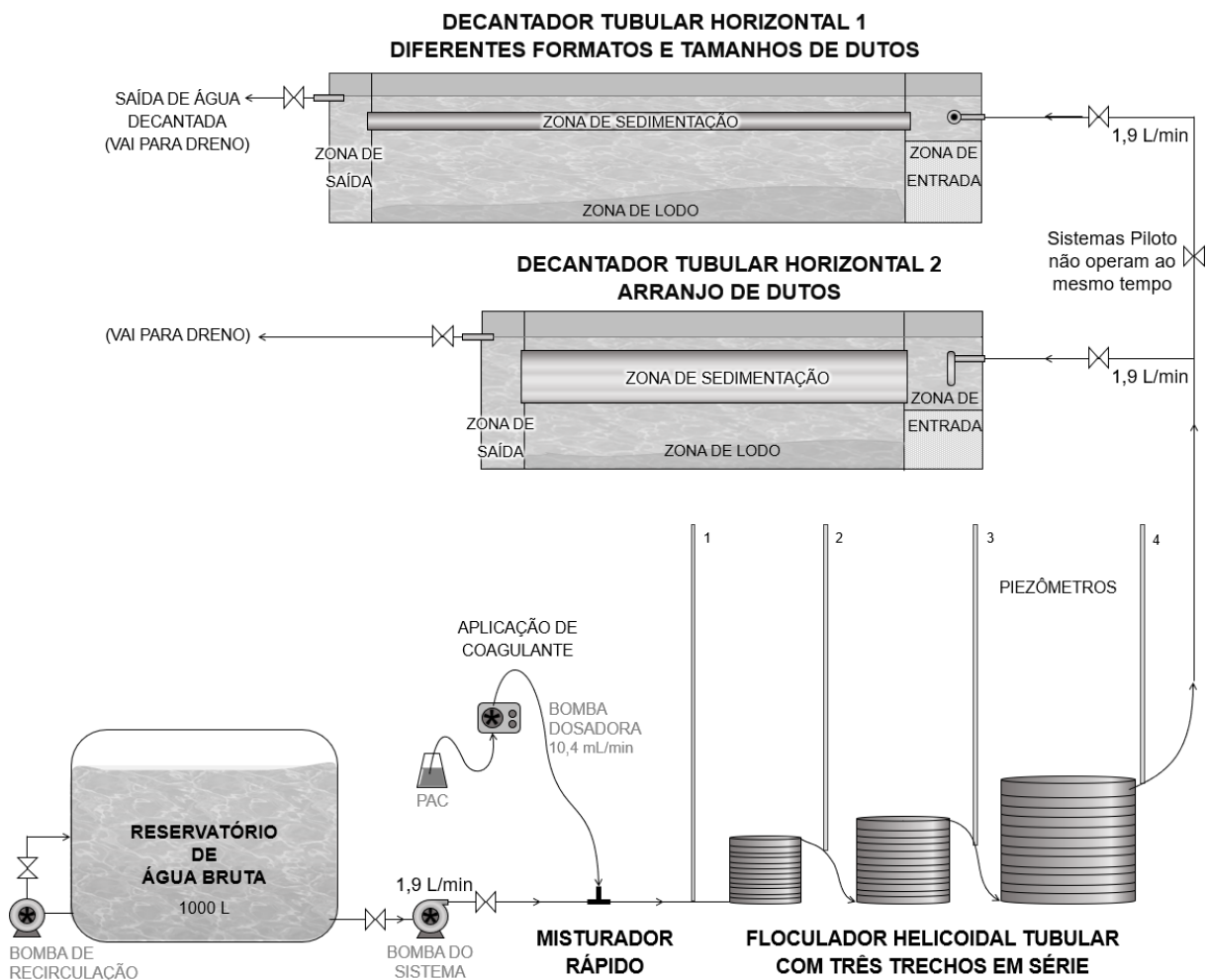
- 1 – Reservatório de água bruta
- 2 – Bomba do sistema
- 3 – Misturador Rápido
- 4 – Floculador
- 5 – Decantador 1
- 6 – Decantador 2
- 7 – Saídas para drenagem
- 8 – Bomba peristáltica dosadora
- 9 – Recipiente com coagulante
- 10 – Bomba de recirculação



A Figura 31, além das unidades de tratamento, contém algumas informações dos sistemas piloto, como:

- a) volume do reservatório de água bruta;
- b) vazão da bomba do sistema;
- c) vazão da bomba de recirculação;
- d) vazão da bomba dosadora de coagulante;
- e) coagulante utilizado;
- f) localização dos registros; e
- g) piezômetros nos trechos do flocculador.

Figura 31 – Desenho esquemático das unidades e funcionamento do sistema piloto.



Como as unidades não estão posicionadas a favor do funcionamento do sistema por gravidade, foi necessária uma bomba centrífuga, para impulsionar a água bruta com a vazão do sistema (1,9 L/min). Primeiramente, a água recebe o coagulante PAC, por meio de uma bomba dosadora peristáltica. A água coagulada passa pelo processo de floculação com três

câmaras em série e, ao sair do flocculador helicoidal tubular, adentra no decantador. A entrada de água flocculada no decantador é afogada, para evitar a quebra de flocos.

Entende-se por água decantada, a água clarificada sobrenadante após a sedimentação das partículas, ou seja, o efluente do decantador. Na saída dos dutos horizontais do decantador, há uma câmara coletora de água decantada, com registros situados na parte superior. Esses registros são posicionados em uma cota para manter o nível d'água dos decantadores sempre acima dos dutos, ou seja, sempre ficam afogados; e servem também para ajuste da vazão dos dutos (no caso do Decantador 1).

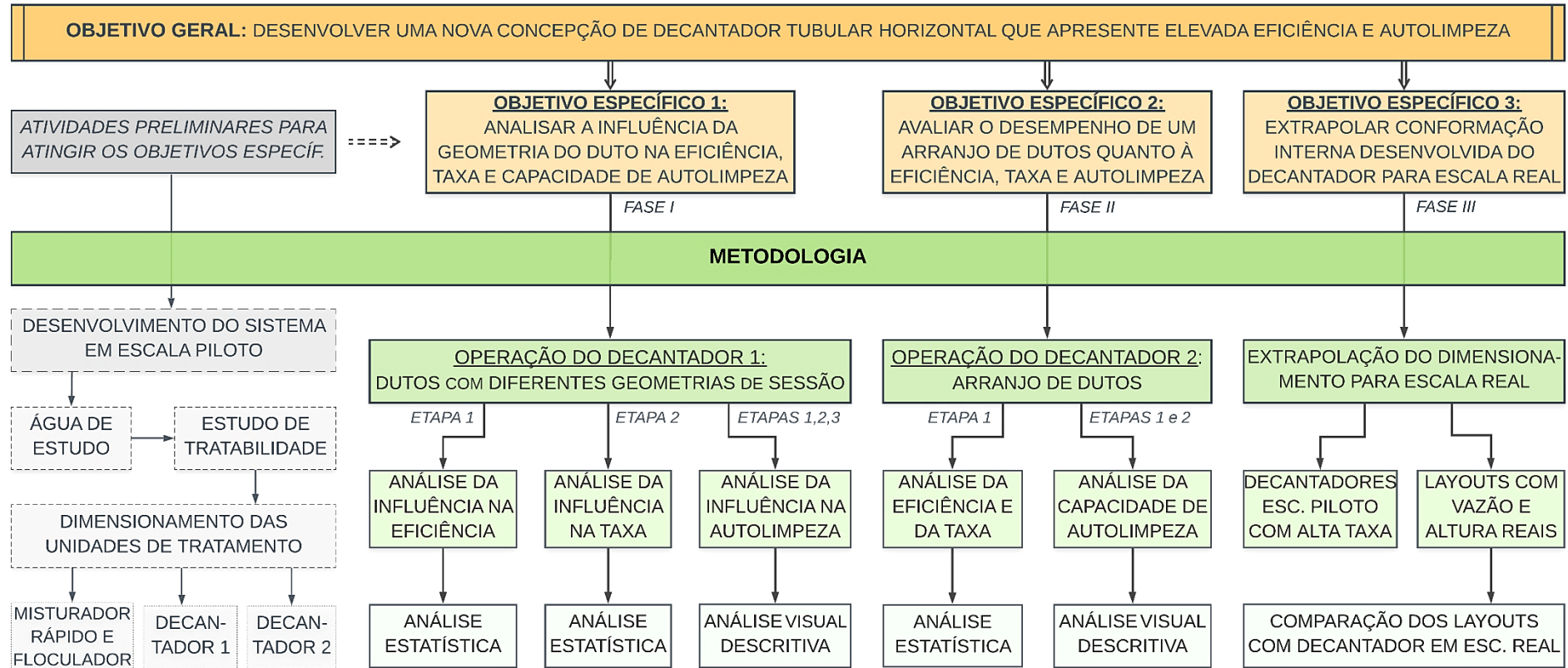
As investigações experimentais foram divididas em duas fases de operação, uma para cada sistema piloto. A Fase I abrangeu a influência da geometria dos dutos de sedimentação com abertura longitudinal inferior no desempenho da clarificação de água no Decantador 1. A mesma ocorreu em três etapas, representantes dos diferentes tipos de operação, a fim de analisar: a eficiência de remoção sólidos na Etapa 1; a taxa de escoamento superficial máxima na Etapa 2; e a capacidade de autolimpeza especificamente na Etapa 3, mas também observada nas etapas 1 e 2.

A Fase II compreendeu a avaliação do desempenho do Decantador 2, dividida em duas etapas, nas quais analisou-se: a eficiência de remoção de sólidos na Etapa 1; e a capacidade de autolimpeza na Etapa 2, bem como na observação da Etapa 1.

Dessa forma, em ambas as Fases foi analisada a capacidade de autolimpeza, tanto nas operações relacionadas aos outros objetivos do trabalho, quanto nas operações realizadas apenas para essa análise (Etapa 3 da Fase 1 e Etapa 2 da Fase II).

Para entender a sequência e abrangência da pesquisa, foi elaborado o fluxograma da metodologia, na Figura 32. O mesmo foi organizado de forma a mostrar como os objetivos do trabalho foram atendidos em cada etapa.

Figura 32 – Fluxograma da metodologia com o ordenamento dos estudos investigativos de acordo com os objetivos do trabalho.



4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PILOTO

4.2.1 Água de Estudo

4.2.1.1 Determinação de parâmetros de qualidade da água bruta sintética

Para obter uma água bruta de maneira prática, com parâmetros físico-químicos constantes (variação mínima) e sem interferentes observados nos mananciais d'água disponíveis, optou-se por prepará-la em laboratório, isto é, utilizar uma água bruta sintética.

Buscou-se uma água sintética capaz de representar uma água superficial natural, com os principais parâmetros a serem removidos no tratamento do tipo convencional até a etapa de decantação, no caso, simplificados como turbidez e cor.

Para definição dos valores desses dois parâmetros da água bruta sintética, as seguintes fontes bibliográficas foram consideradas:

- a) Resolução nº 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), que coloca como necessária a realização de, no mínimo, tratamento convencional nos corpos hídricos que forem destinados ao abastecimento para consumo humano a partir da Classe 2 das Águas Doces, cujas condições são: turbidez até 100 uT; e cor verdadeira até 75 uH;
- b) o estudo de Yao (1979) sobre decantador tubular horizontal, que preparou uma água com turbidez de 100 a 280 uT em seu experimento;
- c) as recomendações de Richter (2009), de turbidez acima de 50 uT e soma dos valores obtidos nos parâmetros cor verdadeira e turbidez superior a 60 unidades, como características da água bruta para se empregar o tipo de tratamento convencional;
- d) os valores de turbidez das águas sintéticas encontrados na literatura relacionada, que variaram basicamente entre 50 e 100 uT (Apêndice A - Quadro 5).

Desse modo, os valores adotados para padronizar os parâmetros de turbidez e cor verdadeira da água bruta de alimentação dos sistemas piloto estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 – Características da água bruta sintética.

Parâmetros:	Turbidez (uT)	Cor verdadeira (uH)	Cor aparente (uH)
Água bruta sintética	120 ± 20	75 ± 5	1500 ± 100

A solução que alcançou os parâmetros pré-definidos de turbidez e cor verdadeira da água bruta sintética apresentou um pH médio de $6,6 \pm 0,1$, um valor dentro do intervalo estabelecido para condições de qualidade da Água Doce de Classe 2 (6,0 – 9,0), segundo a Resolução Conama 357/05. A alcalinidade que caracterizou a solução foi de 11 mg CaCO₃/L.

4.2.1.2 *Matérias-primas da água bruta sintética*

Foi utilizada a água de torneira como uma das matérias-primas que, embora tratada, possui mais impurezas que a destilada ou deionizada. Além disso, em análises anteriores, foi constatado que a água de torneira do laboratório não possui cloro.

Para fornecer turbidez à água sintética, utilizou-se a argila bentonita. Como as argilas possuem granulometria fina, formam-se coloides na água, que deverão ser desestabilizados na etapa de coagulação. Os argilominerais presentes nas argilas são silicatos hidratados de alumínio e ferro, os quais fornecem uma parcela de cor verdadeira para água bruta.

Há três grupos principais de argilominerais: ilinita, caulinita e montmorilonita. A bentonita é formada essencialmente por montmorilonita, de 60 a 95%, sendo o restante geralmente ilinita e caulinita (PAIVA; MORALES; DIAZ, 2008). A maioria dos autores que produz água sintética na área de tratamento de águas superficiais emprega a caulinita ou bentonita para tal, como pode se observar no Quadro 5 do Apêndice A, com informações compiladas da literatura.

No mercado, existe basicamente a bentonita cálcica e sódica. A sódica tem maior capacidade de inchamento na água (SILVA E FERREIRA, 2008) e, por isso, foi escolhida para ser utilizada no experimento.

Após definir como agregar turbidez à água, criou-se uma forma de produzir cor verdadeira elevada na água, a fim de preparar uma água bruta com esses dois parâmetros elevados, típica de tratamento convencional. Desse modo, uma infusão de cor escura, preparada com folhas e talos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) tostada a granel, foi utilizado para aumentar a cor verdadeira da mistura sintética.

4.2.1.3 *Modo de preparo da água bruta sintética*

A água bruta sintética era preparada em uma caixa d'água com capacidade de 1000 L. Esse volume é o suficiente para operar o sistema piloto por aproximadamente 8 horas.

Em testes preliminares, descobriu-se que a proporção de 0,4 g de bentonita por litro de água é o necessário para obter uma turbidez de aproximadamente 120 uT.

Como a solução de bentonita possui cor verdadeira com aproximadamente 20 uH, a infusão de mate era preparada para que a cor verdadeira fornecida à água fosse de 55 uH; para que a cor verdadeira resultante não ultrapassasse o valor pré-determinado (75 uH).

Não há uma proporção exata de erva mate necessária para atingir essa cor verdadeira, pois o preparo da infusão, mesmo que padronizado, produz soluções com valores de cor verdadeira diferenciados, provavelmente devido à variação de cor liberada entre folhas e talos. Dessa forma, tendo uma infusão de cor verdadeira conhecida e elevada, o volume necessário para ser adicionado em água de torneira era calculado por meio da Equação 1, para que resultasse no valor de cor verdadeira desejado na caixa d'água de 1000 L.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (1)$$

Onde C_1 = Cor verdadeira da infusão de erva-mate (uH), V_1 = Volume a ser adicionado da infusão de erva-mate (L); C_2 = Cor verdadeira final da água bruta apenas referente à infusão (55 uH), V_2 = Volume final da água bruta sintética (solução da infusão + água da torneira = 1000 L).

Mais detalhes do preparo da água bruta (passo a passo) foram descritos no Apêndice B. Após o preparo, a água bruta sintética ficava em repouso pelo menos 24 h, pois se notou que floculava e sedimentava melhor do que a água utilizada imediatamente após o preparo. Isso pode ser explicado pelas reações físico-químicas de hidratação e expansão das camadas moleculares que formam a bentonita.

Com a água bruta devidamente preparada, puderam-se realizar os ensaios de tratabilidade, a fim de determinar a melhor dosagem de produtos químicos.

4.2.2 Ensaio de Tratabilidade em Reatores em Descontínuo

4.2.2.1 Produtos químicos aplicados

Os produtos químicos avaliados nos ensaios de tratabilidade foram: o coagulante hidróxicloreto de alumínio ou Policloreto de Alumínio (PAC); e o alcalinizante hidróxido de cálcio em suspensão aquosa (Geocálcio). Ambos os produtos estão sendo muito empregados nas estações de tratamento de água brasileiras, substituindo outros produtos químicos devido à praticidade de aplicação.

Aplica-se neste estudo apenas coagulante comum. Se forem usados artifícios especiais para deixar os flocos mais pesados, como o caso de aplicação de polímero e pulverização de micro areia no momento da formação dos flocos, o rendimento da decantação poderia ser maior.

Nos ensaios preliminares constatou-se a não necessidade de dosar o alcalinizante, assim, nos seguintes ensaios de tratabilidade e no sistema piloto foi dosado apenas o coagulante. O coagulante PAC utilizado no experimento é caracterizado pelas especificações descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do coagulante Policloreto de Alumínio (PAC).

Características	Limites
Teor de Al ₂ O ₃ (%)	Mín. de 10,5
Cloretos	Máx. de 15,0
Resíduo insolúvel (g/L)	Máx. de 0,1
pH a 25° C	Mín. = 2,2 e Máx.= 3,0
Basicidade (% ou m/m)	Mín. = 60,0 e Máx.= 68,0
Densidade a 25° C (g/cm ³)	Mín. = 1,25 e Máx.= 1,31

Legenda: Mín. = mínimo; Máx. = máximo.

O PAC comercial adquirido para realização dos experimentos possui concentração de 421,5 mg/mL. Foi preparada uma solução a partir desse PAC comercial, com concentração de 2% (20 g/L) para utilizar nos ensaios de tratabilidade. Como o PAC é um produto líquido, foi considerada sua densidade a 25°C (entre 1,25 e 1,31 g/cm³) para calcular o volume adicionado em 1 L de água destilada (Equação 2), resultando em 16 mL.

$$V_{PAC} = \frac{m}{d} = \frac{20 \text{ g}}{1,25 \text{ g/cm}^3} = 16 \text{ mL} \quad (2)$$

Onde: V_{PAC} = Volume de PAC comercial adicionado (mL), m = massa de PAC para solução de 2% (g), d = densidade característica do PAC comercial (g/cm³).

A concentração da solução de PAC foi calculada através do rearranjo da Equação 1, com as nomenclaturas adaptadas, conforme Equação 3, cujo valor resultou em 6,7 mg/L.

$$C_{dil} = \frac{C_{PAC} \cdot V_{PAC}}{V_{dil}} = \frac{421,5 \cdot 16}{1000} = 6,74 \text{ mg/mL} \quad (3)$$

Onde: C_{dil} = concentração da solução de PAC (mg/mL), C_{PAC} = concentração do PAC comercial (mg/mL), V_{dil} = volume da diluição (mL).

O volume da solução de PAC que revelou os melhores resultados nos ensaios de tratabilidade foi em média de 11 mL. A dosagem ótima final de PAC, determinada pela Equação 1 adaptada (Equação 4), resultou em 37,1 mg/L, sendo a média aplicada nas operações do sistema piloto.

$$C_{\text{jarro}} = \frac{C_{\text{dil}} \cdot V_{\text{dil}}}{V_{\text{jarro}}} = \frac{6,74 \cdot 11}{2} = 37,1 \text{ mg/L} \quad (4)$$

Onde: C_{jarro} = dose de PAC (mg/mL), C_{dil} = concentração da solução de PAC (mg/mL), V_{dil} = volume pipetado da solução de PAC (mL), V_{jarro} = volume do jarro de Jarrest (mL).

Essa dosagem ótima foi regulada por uma bomba dosadora (Equação 1 adaptada), que aplicava uma vazão de 10,4 mL/min no sistema piloto.

$$Q_2 = \frac{C_{\text{jarro}} \cdot Q_1}{C_{\text{dil}}} = \frac{37,1 \cdot 1900}{6,74} = 10,4 \text{ mL/min} \quad (5)$$

Onde C_{jarro} = Dose de PAC requerida (mg/L), Q_1 = vazão do sistema (1900 mL/min); C_{dil} = concentração da solução de PAC (mg/L), Q_2 = vazão da bomba peristáltica dosadora (mL/min).

4.2.2.2 Procedimentos do ensaio de tratabilidade

A realização dos ensaios de tratabilidade teve o objetivo de constatar a melhor dosagem de produtos químicos para a água bruta sintética do estudo, assim como, determinar alguns parâmetros de projeto para a construção ou posterior ajuste das unidades de tratamento.

Tais ensaios foram controlados, de modo a buscar reproduzir as diferentes condições de projeto de coagulação, floculação e decantação, determinando:

- a) melhor dosagem de coagulante PAC;
- b) melhor dosagem de alcalinizante Geocálcio;
- c) otimização do gradiente de velocidade e tempo da mistura rápida (coagulação);
- d) otimização do gradiente de velocidade e tempo de floculação;
- e) determinação da velocidade de sedimentação dos flocos.

O equipamento usado para o teste de tratabilidade em jarros, ou *Jarrest*, nesta pesquisa (Figura 33) possui os acessórios e características descrito no Anexo A. Neste anexo, igualmente estão apresentados os passos do procedimento de *Jarrest*, descritos no livro de Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002).

As condições empregadas nos ensaios iniciais foram:

- a) gradiente de velocidade de mistura rápida ($G_{\text{MR}} = 800 \text{ s}^{-1}$ (400 rpm));
- b) tempo de mistura rápida ($T_{\text{MR}} = 30 \text{ s}$);
- c) gradiente de velocidade da floculação ($G_{\text{f}} = 30 \text{ s}^{-1}$ (40 rpm));
- d) tempo de floculação ($T_{\text{f}} = 20 \text{ min}$);

Figura 33 – Equipamento Jarrest (com reatores em descontinuo) utilizado nesta pesquisa.



Os ensaios iniciaram com a dosagem do coagulante apenas. Somente após a determinação da melhor dose de coagulante se testou diferentes doses de alcalinizante, para avaliar o pH ideal de coagulação. Após os testes, onde a melhor dosagem de geocálcio foi nula, optou-se em não aplicar alcalinizante no sistema.

As doses da solução de coagulante PAC a 2% testadas variaram de 2 a 44 mg/L (com intervalos de 2 mg/L), com pH variando entre 6,2 e 6,6. Nessa etapa, avaliou-se a turbidez remanescente da água decantada para determinar a melhor dose.

A afinagem dos parâmetros se deu com o teste de tempos de duração da coagulação e floculação com faixas de valores apresentados na literatura. Na otimização da coagulação, os T_{MR} aplicados foram iguais a 1; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; e 30 s para cada G_{MR} testado: 500, 800 e 1000 s^{-1} . Na otimização da floculação, os T_f testados foram de 10'; 12'20"; 14',40"; 17'; 19'20"; e 21'40" para cada G_f : 17, 28 e 34 e 46 s^{-1} .

Após a determinação da melhor dosagem de produtos químicos e otimização dos gradientes de velocidade e tempos da mistura rápida e floculação, pôde-se determinar a velocidade de sedimentação dos flocos formados. A mesma foi determinada em função da turbidez remanescente menor que 2 uT, estabelecida como mais conveniente. Esse valor foi adotado, pois geralmente se consegue carreiras de filtração maiores quando a turbidez da água decantada é menor que 2 ou 3 uT. Di Bernardo, Dantas e Voltan, (2017) afirmaram que a turbidez da água decantada não deve ultrapassar 5 uT, para que os filtros funcionem com turbidez da água filtrada menor que 0,5 uT e com carreira de filtração com duração razoável (> 24h).

4.2.3 Descrição do Sistema Piloto

A vazão de alimentação e de projeto das unidades de tratamento foi igual a 1,9 L/min. Conforme observado na Figura 30 (no item 4.1), as unidades do sistema piloto são: um misturador rápido; um floculador; e dois decantadores (operados em momentos diferentes). As unidades de decantação foram idealizadas para serem construídas em material transparente.

4.2.3.1 Misturador rápido e floculador

O piloto de decantação foi alimentado por água floculada. Por isso, previamente, foi necessária a realização do processo de coagulação e floculação a partir de uma água bruta adequada para o tratamento convencional.

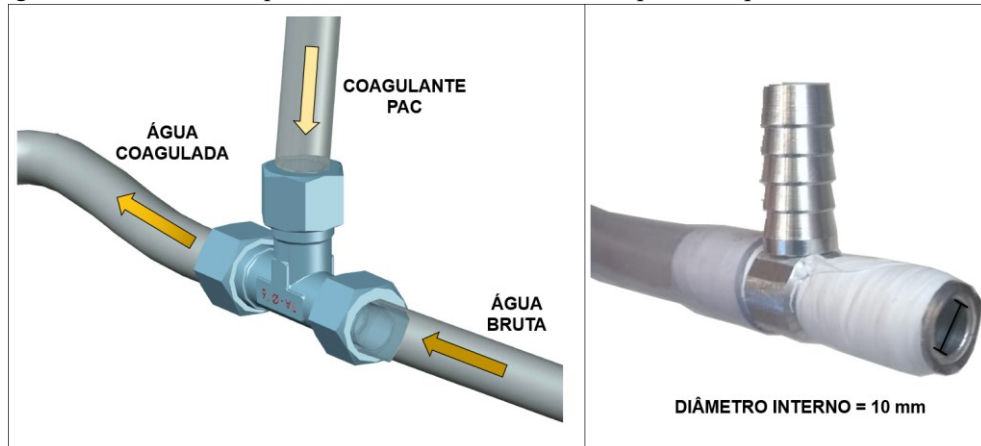
Primeiramente, teve que se estabelecer o tipo de misturador rápido e floculador, sendo considerado mais propício para o experimento o tipo hidráulico. Considerando os parâmetros determinados no ensaio de tratabilidade, optou-se por unidades mais práticas e econômicas de se obter, uma vez que os processos de coagulação e floculação não são o foco da pesquisa. Além disso, como a vazão foi pré-fixada e buscou-se mantê-la constante ao longo de todos os experimentos, não houve contratempos decorrentes de mudança de gradiente de velocidade e tempo de detenção. Outra vantagem de utilizar o tipo hidráulico é evitar mais a ocorrência de curtos-circuitos e, por isso, admitir tempos de processo menores que o tipo mecânico.

A mistura rápida hidráulica em linha foi realizada através de uma injeção na canalização, que provoca uma dispersão do coagulante em aproximadamente 1 s. O misturador rápido escolhido foi uma peça em metal, com diâmetro interno do tubo de entrada igual à 10 mm, observado na fotografia e desenho esquemático da Figura 34. O gradiente de velocidade dessa peça foi calculado por meio da Equação 6 (RICHTER, 2009), resultando em cerca de 500 s^{-1} . Os parâmetros utilizados encontram-se no Apêndice C.

$$G_{MR} = n \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho}{\mu}} \cdot Rh^{-0,67} \cdot u^{1,5} \quad (4)$$

Onde G_{MR} = Gradiente médio de velocidade da mistura rápida (s^{-1}), n = rugosidade do tubo ou coeficiente de Manning (adim.), g = aceleração da gravidade (m/s^2), ρ = densidade da água (kg/m^3), μ = viscosidade dinâmica da água (N.s/m^2), Rh = Raio hidráulico (m), u = velocidade da água no tubo (m/s).

Figura 34 – Desenho esquemático e foto do misturador rápido do tipo hidráulico em linha.



O modelo do floculador hidráulico de fluxo pistão foi formado por um tubo flexível envolto em um determinado objeto cilíndrico (para dar resistência à estrutura), de modo a proporcionar um fluxo helicoidal à água coagulada e, por isso, sendo chamado de Floculador Tubular Helicoidal (FTH). O fluxo helicoidal pode ser na direção vertical ou horizontal, no caso deste estudo, foi eleita a direção vertical, com sentido ascendente. Dessa forma, o floculador ficou com nível d'água abaixo do nível d'água do decantador, evitando a entrada ar no sistema.

Foi construído apenas um floculador a partir de três trechos em série de mangueira cristal com diâmetros diferentes, analogamente às câmaras de diferentes áreas em um floculador de chicanas. Cada trecho representa um gradiente médio de velocidade diferente na floculação, por isso, com diâmetros diferentes, adotados como: 12,7; 19,1; e 25,4 mm. Visto que o gradiente de velocidade deve sempre diminuir de um trecho para o outro, as mangueiras foram organizadas do menor diâmetro para o maior, pois quanto maior a área da sessão do tubo, menor o gradiente de velocidade.

O tempo de detenção foi adotado levando em consideração as recomendações das literaturas abordadas no item 3.1 e os resultados do Jarrest, sendo assim, foi assumido um tempo total de floculação de 15 min 52 s.

O tempo de floculação de cada um dos três trechos (t_{fi}) foi calculado a partir da vazão do floculador (Q_f), da área da seção da mangueira de cada trecho (A_i), e do comprimento adotado de cada trecho de mangueira (L_i), conforme a Equação 4.

$$t_{fi} = \frac{L_i \cdot A_i}{Q_f} \quad (4)$$

Onde i é o trecho em questão (1, 2 ou 3).

Inicialmente, conforme foi se adotando os comprimentos dos trechos, iam sendo calculados os tempos, cuja somatória resultasse em 15 min 52 s.

O gradiente de velocidade da floculação foi determinado calculando a perda de carga nos trechos do floculador, por meio da Equação 5. Alguns estudos acerca de FTH defendem que, no cálculo da perda de carga (Δh), deva ser utilizado o comprimento equivalente, ao invés do comprimento real do tubo, por isso, no cálculo da perda de carga utilizou-se o comprimento equivalente na fórmula de Darcy-Weisbach.

$$G_f = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot Q_f \cdot \Delta h}{V_f \cdot \mu}} \quad (5)$$

Onde G_f = Gradiente médio de velocidade da floculação (s^{-1}), ρ = densidade da água (kg/m^3), g = aceleração da gravidade (m/s^2), Q_f = vazão do floculador (m^3/s), Δh = perda de carga na mangueira (m), V_f = volume do floculador (m^3), μ = viscosidade dinâmica da água ($N.s/m^2$).

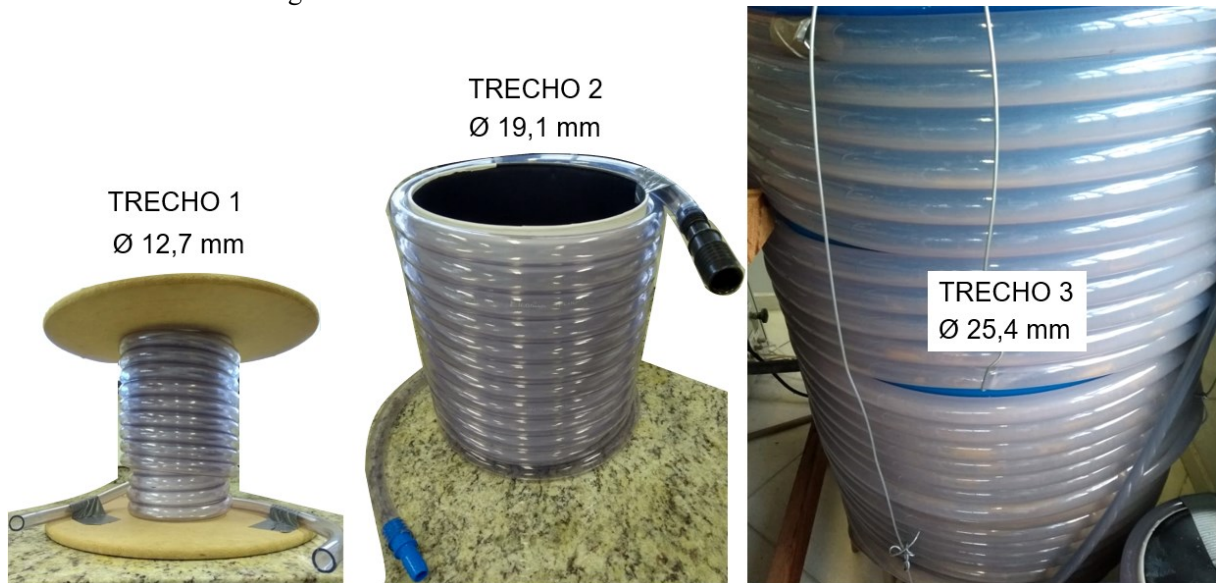
O gradiente de velocidade teórico, calculado para cada trecho está disposto na Tabela 5. A fim de calcular a o gradiente de velocidade real nos trechos do floculador usando a Equação 5, foram instalados quatro piezômetros antes e após cada trecho do floculador, para medir a perda de carga real.

Tabela 5 – Parâmetros dos trechos em série do floculador tubular helicoidal.

Trecho	Diâmetro interno (d)	Comprimento (m)	Tempo de floculação (min)	Velocidade longitudinal no tubo (u) (m/s)	Gradiente de velocidade teórico (s^{-1})
1	12,7 mm_ (½ pol)	9,3	0,7	0,23	244
2	19,1 mm_ (¾ pol)	10,7	1,8	0,10	57
3	25,4 mm_ (1 pol)	50,0	13,4	0,06	20
Total	-	70,0	15,9	-	-

Na Figura 35 é demonstrado cada trecho em série do floculador tubular helicoidal bem como o diâmetro interno das mangueiras utilizadas para construção.

Figura 35 – Trechos em série do floculador tubular helicoidal.



Essas etapas prévias ao decantador, de coagulação e floculação, sempre foram consideradas ao longo do período de experimento. Anterior a cada operação do sistema piloto, era realizado um ensaio *Jartest* para verificar visualmente a eficiência do coagulante, bem como determinar a respectiva dose ideal.

Os gradientes de velocidade utilizados em tais ensaios de *Jartest* eram os calculados a partir da perda de carga medida nos piezômetros instalados no floculador. As demais condições do sistema piloto (tempos e gradientes) também foram aplicadas nesses ensaios. Além disso, em todos os dias de operação do sistema piloto, também era observado visualmente o tamanho dos flocos e cor da água floculada na antecâmara do decantador.

4.2.3.2 Decantador 1

O Decantador 1 foi construído a fim de analisar aspectos construtivos da nova concepção, verificando se o dimensionamento da unidade permite uma decantação eficaz. Com o propósito de testar diferentes possibilidades de conformação interna, optou-se por construir dutos horizontais de sedimentação de diferentes sessões geométricas e, assim, analisar a influência da geometria na eficiência do decantador, na taxa de escoamento superficial aplicada e na capacidade de autolimpeza.

Todos os dutos e paredes foram construídos em acrílico transparente, para facilitar a visualização do comportamento dos flocos no interior dos dutos, em relação à autolimpeza.

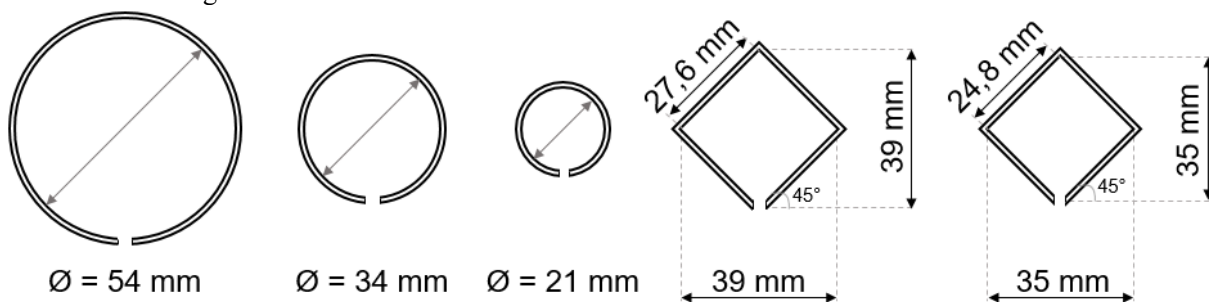
Para desenvolver essa unidade, foi necessário determinar aspectos geométricos quanto ao formato e tamanho da seção transversal dos dutos horizontais e quanto a abertura longitudinal inferior. Devido à dificuldade de se trabalhar em acrílico, as larguras dessa

abertura inferior variaram um pouco de acordo com o tamanho do duto. A unidade de decantação 1 foi concebida contendo cinco tipos de dutos horizontais, cujas características estão contidas na Tabela 6 e na Figura 36.

Tabela 6 – Características dos dutos horizontais de sedimentação do Decantador 1

Número de referência	Formato do Duto	Diâmetro interno ou Lado interno do Duto (mm)	Espessura da parede de acrílico (mm)	Largura da abertura longitudinal inferior (mm)
1	Circular	54	3,0	3,4
2	Circular	34	3,0	3,4
3	Circular	21	2,0	2,2
4	Losangular	28	4,0	3,4
5	Losangular	25	4,0	3,0

Figura 36 – Desenho com as medidas dos dutos horizontais do Decantador 1.



Quando se analisa a influência do tamanho da seção dos dutos em algum parâmetro, sempre se refere à distância vertical da seção transversal que cada duto apresenta para o floco percorrer, e ser removido na abertura longitudinal inferior.

A influência do tamanho do duto foi avaliada por meio da comparação entre os diâmetros dos dutos circulares, e entre a altura dos dutos losangulares, em relação a eficácia do decantador (eficiência, taxa e autolimpeza). Analogamente, a influência do formato nesses parâmetros foi verificada comparando o duto circular 2 e duto losangular 5, que possuem praticamente mesma altura vertical para o floco percorrer.

A Figura 37 mostra um desenho esquemático do Decantador 1, incluindo os cinco dutos horizontais, entrada com distribuição comum de água floculada e saídas individuais para comparação entre a água decantada de cada duto. Na entrada ou antecâmara, foi construído um dispositivo perfurado, usado para distribuir melhor a água floculada em cada duto. Mais detalhes da unidade piloto construída podem ser visualizados na Figura 38.

Figura 37 – Desenho esquemático da unidade piloto Decantador 1.

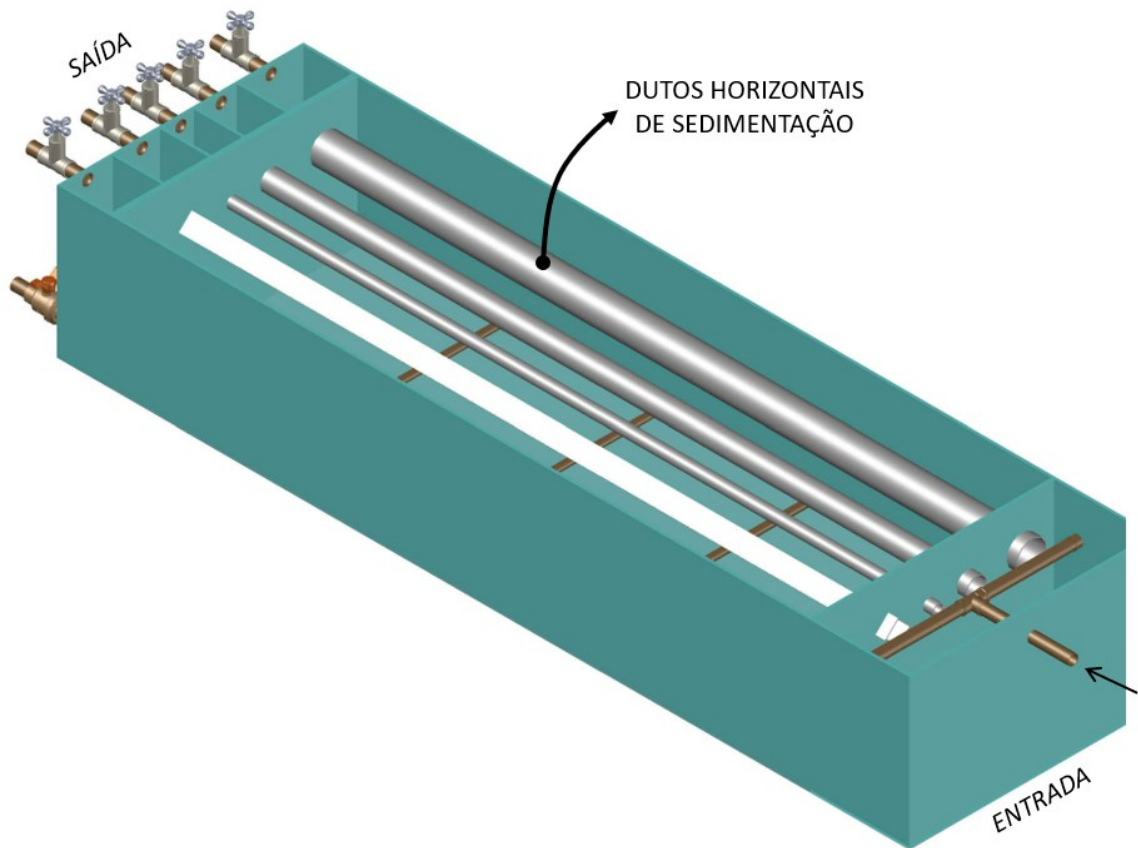
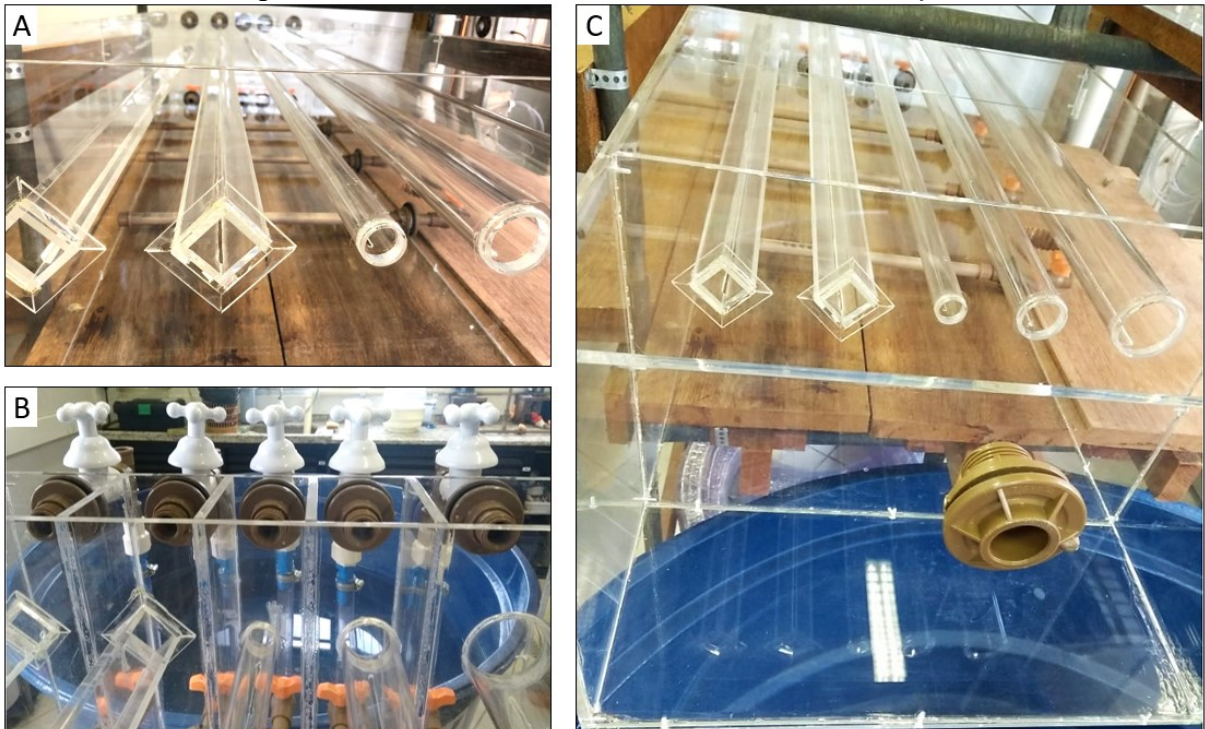


Figura 38 – Entrada e saída dos dutos da unidade de Decantação 1



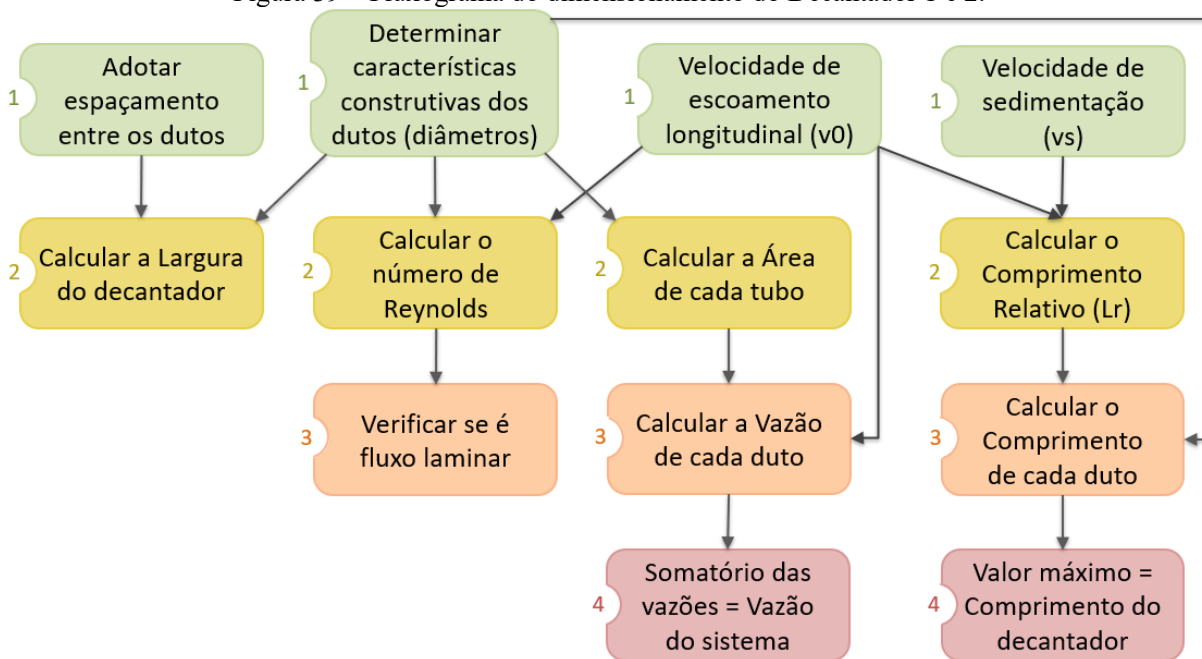
Legenda: A = Detalhe entrada e abertura longitudinal inferior dos dutos; B = dutos em direção às câmaras de saída individuais; C = imagem geral do decantador.

4.2.3.2.1 Dimensionamento

A sequência dos passos para realizar o dimensionamento do decantador 1 é elucidada por meio do fluxograma da Figura 39. Houve quatro frentes iniciais de cálculos, que foram basicamente com adoções de parâmetros. Adiante se perceberá que essas adoções foram feitas para a pior situação de operação, como um fator de segurança, pois a intenção é que os flocos sedimentem antes da zona de saída.

O primeiro passo foi determinar as características construtivas dos dutos horizontais do decantador, já realizado no item 4.2.3.2. Dentre os dutos citados nesse item, o que tem maior diâmetro (ou altura vertical) é o tubo circular de 54 mm, cuja situação teoricamente é a mais crítica para o floco que entra na posição central superior. Por isso, esse tubo será colocado em evidência em algumas etapas do dimensionamento.

Figura 39 – Fluxograma do dimensionamento do Decantador 1 e 2.



A intenção foi adotar um valor elevado de velocidade longitudinal e baixo de velocidade de sedimentação dentro do recomendado pela literatura, pois quanto maior o valor de v_0 e menor o valor de v_s , maior necessita ser a distância horizontal (comprimento da zona de sedimentação do decantador); seguindo a linha de projetar para uma situação crítica de operação (com escoamento elevado e floco mais leve). Desse modo, o valor de comprimento relativo (L_r) ficou propositalmente elevado.

Uma vez que não se dispôs de nenhuma das velocidades (v_0 e v_s), ambas foram adotadas. Richter (2009) sugere, para efeito de dimensionamento de decantadores tubulares, que a velocidade longitudinal (v_0) deva se limitar a 30 cm/min (0,50 cm/s), para evitar o

arrasto de flocos. A norma ABNT NBR 12216/92 também indica a utilização desse valor como máximo para estações menores. Di Bernardo (2017) afirma que essa velocidade não deve ultrapassar 40 cm/min (0,67 cm/s). Como o objetivo foi adotar parâmetros fundamentados na literatura, porém para uma condição pior de operação, foi adotado v_0 igual a 38,5 cm/min (0,64 cm/s).

A NBR 12216/92 sugere uma velocidade de sedimentação igual a 1,74 cm/min para estações com vazão menor do que 11,6 L/s, quando sem ensaio de tratabilidade ou com má operação. Já Richter (2009) afirma que os flocos formados com o coagulante sulfato de alumínio assumem vs compreendida entre 1,25 e 4,86 cm/min (18 a 70 m/d). Como os flocos de PAC geralmente são mais pesados, segundo a literatura, adotou-se vs igual a 1,45 cm/min (21 m/d ou 0,02 cm/min).

Com a velocidade longitudinal e velocidade de sedimentação adotadas de acordo com a literatura, pôde-se calcular o comprimento relativo (L_r). Para o decantador em questão, com dutos horizontais, o L_r é igual à distância horizontal no eixo longitudinal (comprimento do duto) sobre a distância vertical no eixo transversal (altura da seção do duto) que o floco deve percorrer para ser removido na situação limite, ou mesmo, a relação entre as velocidades nos dois eixos, como demonstrado na Equação 6.

$$L_r = \frac{dh_L}{dv_T} = \frac{v_0}{v_S} \quad (6)$$

Onde L_r = comprimento relativo (adim.), dh_L = distância horizontal percorrida no eixo longitudinal do duto (m), dv_T = distância vertical percorrida no eixo transversal do duto (m), v_0 = velocidade de escoamento longitudinal (m/s), v_S = velocidade de sedimentação da partícula (m/s).

A distância vertical (dv_T) é a altura que os flocos situados em uma posição mais crítica têm de percorrer para serem removidos. Essa posição crítica é o centro superior da seção do duto, isto é, depende da geometria. Nos tubos circulares, a distância vertical é igual ao diâmetro. Já nos dutos losangulares é a medida da diagonal vertical.

Com os valores do comprimento relativo (L_r) e as características dos dutos, no caso a distância vertical (dv_T), é possível calcular a distância longitudinal (dh_L) necessária para o floco sedimentar e sair pela abertura longitudinal inferior de cada duto. Isolando o termo dh_L na Equação 6, tem-se a Equação 7.

$$dh_L = L_r \cdot dv_T \quad (7)$$

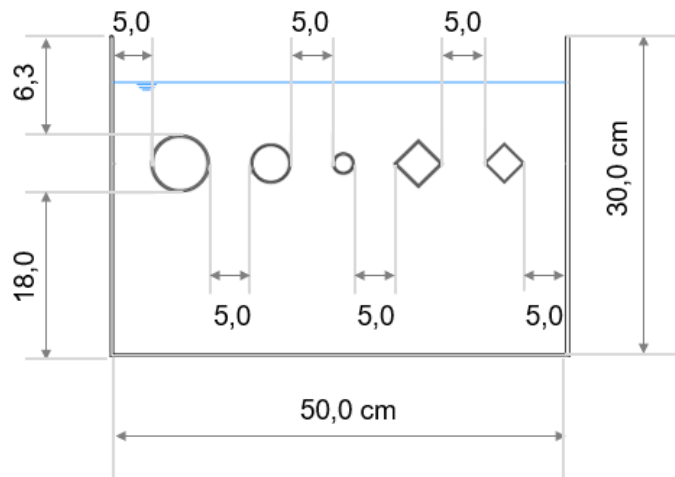
O comprimento da zona de sedimentação e de lodo (onde ficam os dutos horizontais do decantador) deve ser igual a maior distância horizontal (dh_L) calculada.

A intenção em manter o mesmo comprimento para todos os dutos é de manter um parâmetro fixo, que permita verificar a influência apenas dos diferentes tamanhos e formatos (geometria) nos parâmetros já citados, de eficiência, taxa e autolimpeza. Com comprimento igual para todos os dutos, pode-se então recalculer o L_r e v_0 , a fim de visualizar a velocidade do fluxo possível de aplicar em cada duto, considerando a mesma v_s (1,45 cm/min).

A largura do decantador foi obtida de maneira simples, sendo adotado um espaçamento de 5 cm entre os dutos e entre os dutos e as paredes laterais do decantador, somado às larguras de cada duto (Figura 40).

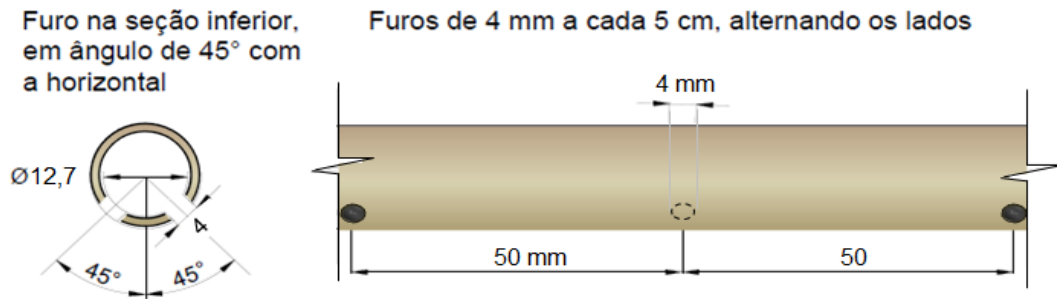
A remoção de lodo foi por descarga hidráulica, porém, não foi feito o uso do fundo de tronco piramidal invertido, aplicado com frequência atualmente. Para remover o lodo, foram colocados três tubos de PVC, rentes e paralelos ao fundo plano e, portanto, resultou em um decantador menos profundo. Assim, adotou-se uma altura total igual a 30 cm para o decantador, ficando em torno de 18 cm para a zona de lodo, como pode se ver na Figura 40.

Figura 40 – Corte do decantador 1, mostrando a detalhes da conformação interna, largura e altura.



Os drenos de descarga de lodo, com diâmetro interno igual a 12,7 mm, contêm furos de diâmetro de 4 mm direcionados para baixo, intercalados a cada 5 cm, em um ângulo de 45° com a vertical (Figura 41). Os três tubos ficaram localizados mais a jusante do decantador, equidistantes entre si (a 30 cm).

Figura 41 – Detalhe do dreno de descarga de lodo.



O Decantador 1 possui uma câmara de entrada (antecâmara) com dimensões de 20 x 50 x 30 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente. Essa unidade piloto apresenta câmaras de saídas individuais para cada duto.

Para calcular a vazão do sistema que irá operar em um piloto de cada vez, deve-se primeiro calcular a área da seção de cada duto. Assim, foram efetuados os cálculos para os tubos circulares ($\pi \cdot r^2$), e losangulares (a metade do produto entre diagonal vertical e horizontal).

Uma vez com as áreas das sessões (A_i) e a velocidade longitudinal (v_0) dos dutos, procedeu-se com o cálculo da vazão (Q_i) em cada duto (Equação 8), sendo “i” os diferentes dutos. Ao somar as vazões de cada duto do decantador 1, obtém-se a vazão total do sistema.

$$Q_i = v_0 \cdot A_i \quad (8)$$

Onde: Q_i = vazão individual do duto (m^3/d); v_0 = velocidade de escoamento longitudinal (m/d). A_i = área molhada da seção do duto (m^2);

Para o cálculo da taxa de escoamento superficial, utilizou-se a vazão total do decantador e a área de sedimentação vista em planta, isto é, a área apenas dos dutos horizontais vista de cima, como indicado na Equação 9.

$$q = \frac{Q_{dec}}{A_{sed}} \quad (9)$$

Onde q = taxa de escoamento superficial ($m^3/m^2 \cdot d$), Q_{dec} = vazão total do decantador (m^3/d), A_{sed} = área superficial de sedimentação total do decantador (m^2).

Sendo que, a área superficial de sedimentação de um duto ($A_{sed\ 1d}$) é dada pela Equação 10.

$$A_{sed\ 1d} = dh_L \cdot dh \quad (10)$$

Onde dh_L = distância horizontal no eixo longitudinal do duto, ou comprimento do duto (m), dh = distância horizontal da seção do duto, seja o diâmetro ou a diagonal horizontal (m).

A fim de verificar se o fluxo do decantador construído é laminar, avaliou-se o número de Reynolds. Esse parâmetro foi calculado a partir da velocidade longitudinal, raio hidráulico dos dutos e viscosidade cinemática da água, conforme a Equação 11.

$$N_R = \frac{4 \cdot Rh \cdot v_0}{\nu} \quad (11)$$

Onde N_R = número de Reynolds (adim.), Rh = raio hidráulico (m), ν = viscosidade cinemática da água ($9,9 \cdot 10^{-7}$ para 21°C) (m^2/s).

4.2.3.3 Decantador 2

Para dar um passo a mais em direção à escala real, desenvolveu-se um arranjo de dutos na zona de sedimentação do decantador. A concepção do arranjo de dutos surgiu na tentativa de deixar a parede de um duto encostada na outra, havendo a intenção de ocupar menos área superficial com o espaçamento entre dutos. O arranjo também foi idealizado de modo que a parte externa dos dutos servisse de plano inclinado para o deslizamento dos flocos que saem pela abertura dos dutos acima. Por conseguinte, formaram-se várias fileiras inclinadas de dutos emparelhados, espaçadas entre uma e outra, similar a uma matriz.

Para ter uma compreensão inicial de um arranjo de dutos, construiu-se uma segunda unidade de decantação. A mesma não deve ser comparada com o decantador 1, somente serviu de experimentação extra; para visualizar o comportamento dos flocos por entre os perfis até a zona de lodo, analisando eficiência e capacidade de autolimpeza do arranjo.

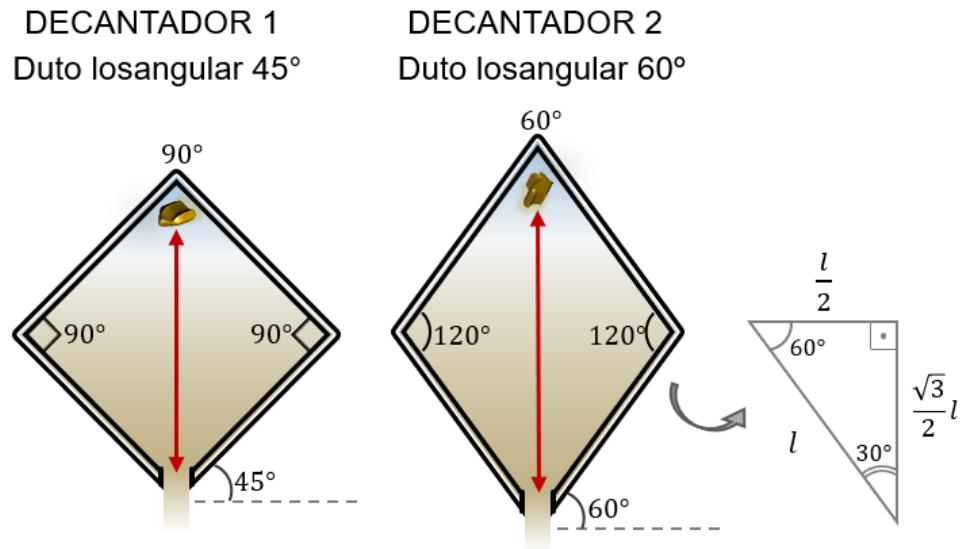
Como não se dispunha de tempo hábil de esperar o resultado do decantador 1 para iniciar a construção de uma segunda unidade piloto, adotou-se um formato de duto losangular. Assim, o arranjo é formado por 9 dutos losangulares, dispostos em três colunas e três linhas.

Nos dutos desta unidade, foi adotado um ângulo de 60° entre o lado da seção losangular e o eixo horizontal. A intenção foi propiciar um ângulo maior para os flocos deslizarem mais facilmente. Cada duto foi confeccionado com as seguintes dimensões:

- a) lado interno: 36 mm;
- b) diagonal horizontal: 36 mm;
- c) diagonal vertical: 60 mm.

A diferença entre os dutos losangulares dos Decantadores 1 e 2 é o ângulo que a face lateral forma com a horizontal. No Decantador 1 o ângulo é próximo a 45° , já no Decantador 2 é igual a 60° (Figura 42).

Figura 42 – Representação da seção dos dutos losangulares do Decantador 1 e 2, mostrando ângulos internos, ângulo formado com o eixo horizontal e diagonal vertical percorrida pelos flocos.



Assim como no Decantador 1, a antecâmara do Decantador 2 também é única para todos os dutos, bem como, recebeu um dispositivo análogo ao do Decantador 1, construído para distribuir melhor a vazão em cada duto na antecâmara. Diferentemente do Decantador 1, a câmara de saída do Decantador 2 é comum para todos os dutos, pois não há comparação entre os resultados dos mesmos.

A Figura 43 ilustra o layout do Decantador 2, construído também todo em acrílico, devido a transparência necessária à observação dos processos no interior da unidade. Algumas imagens desta unidade piloto também podem ser vistas na Figura 44.

Figura 43 – Desenho esquemático do Decantador 2 (com corte na lateral).

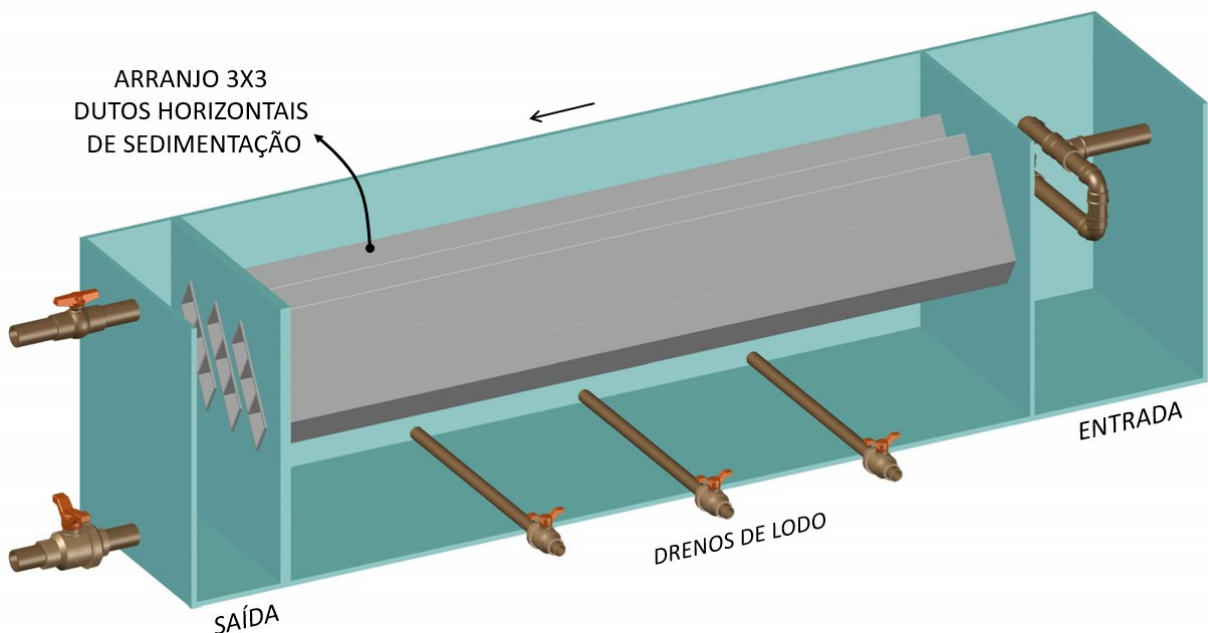
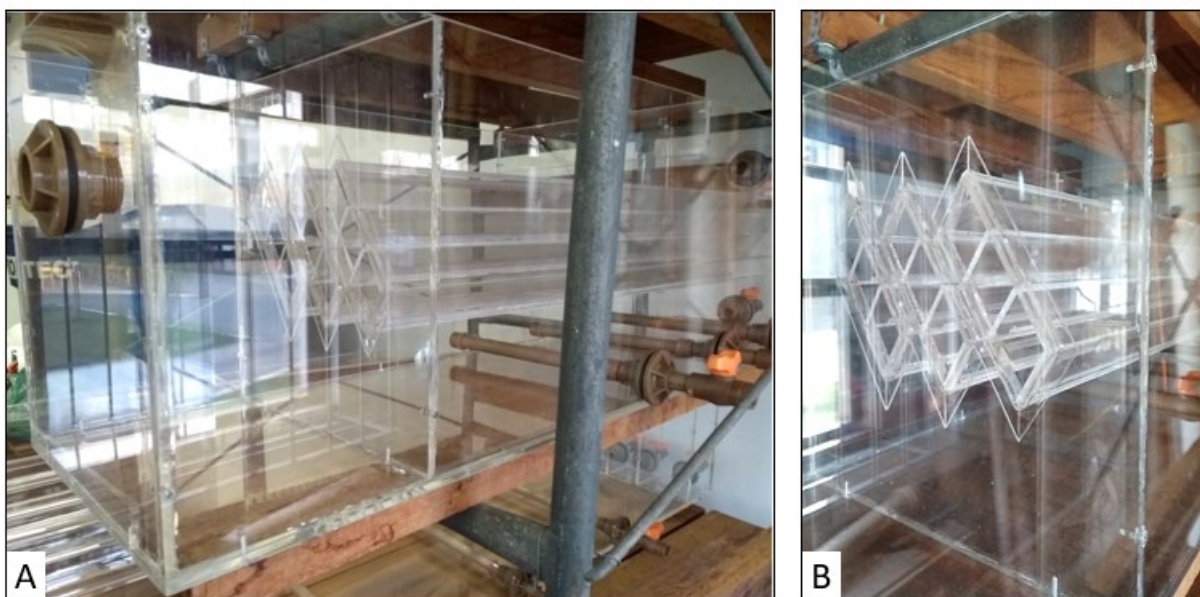


Figura 44 – Unidade em escala piloto de Decantação 2.



Legenda: A = imagem geral externa; B = arranjo de dutos losangulares.

4.2.3.3.1 Dimensionamento

A fim de se projetar para testar a capacidade de remoção desse decantador em condições melhores de operação para velocidade de escoamento longitudinal, adotou-se uma v_0 menor, igual a 20 cm/min (0,33 cm/s).

A velocidade de sedimentação adotada para dimensionamento desta unidade era igual ao do Decantador 1, porém devido a construção da unidade em desacordo com o projeto, foi aqui ajustada para 1,32 cm/min (19 m/d) para o dimensionamento resultar no decantador construído em escala piloto.

De maneira análoga ao Decantador 1, o restante do dimensionamento foi realizado de acordo com o fluxograma da Figura 39, em relação ao comprimento relativo, distância horizontal (comprimento do decantador), vazão nos dutos, e número de Reynolds. Os drenos de descarga de lodo foram os mesmos descritos no dimensionamento do Decantador 1 (item 4.2.3.2.1).

Para determinar a largura, considerou-se uma folga de cerca de 5 cm de cada lado do arranjo de dutos. Na área abaixo do arranjo, foi adotado em torno de 20 cm de profundidade para a zona de lodo, e estimado cerca de 5 cm como borda livre acima dos dutos.

4.3 PARÂMETROS DE CONTROLE

Os parâmetros de controle avaliados na operação do sistema, o método analítico, bem como o equipamento de medição estão descritos no Quadro 1. As medições foram realizadas na operação das Etapas 1 e 2 do Decantador 1, e da Etapa 1 do Decantador 2.

A leitura do parâmetro cor aparente foi realizada com o comprimento de onda de 455 nm, calibrado com padrões de Platina/Cobalto.

Na caracterização da água bruta sintética, foi feita análise de alcalinidade, cujo método analítico utilizado foi de titulação – 2320 B (APHA, 2017).

Quadro 1 – Parâmetros, método analítico e equipamentos utilizados para análises físico-químicas.

Parâmetro	Método analítico	Equipamento
Turbidez (uT)	Nefelométrico – 2130b (APHA, 2017)	Turbidímetro <i>HACH</i> 2100N
Cor aparente e Cor verdadeira (uH)	Espectrofotométrico – 2120C (APHA, 2017)	Espectrofotômetro <i>HACH</i> DR2800
pH	Eletrométrico – 4500-H ⁺ B (APHA, 2017)	Medidor multiparâmetros <i>HACH</i> HQ40D – Sonda pH
Temperatura (°C)	2550 B (APHA, 2017)	Medidor multiparâmetros <i>HACH</i> HQ40D – Sonda pH

Os pontos de coleta de água afluyente e efluente aos dois decantadores em escala piloto, assim como, de água bruta sintética, que foram analisados neste estudo, estão representados esquematicamente na Figura 45. A Figura 46 mostra com maior detalhe a forma que eram coletadas as amostras de água floculada no Decantador 1, com uso de uma seringa em frente a cada duto, para sucção dos flocos que estavam adentrando nestes.

Figura 45 – Esquema dos pontos de coleta de amostra da água ao longo dos experimentos de decantação.

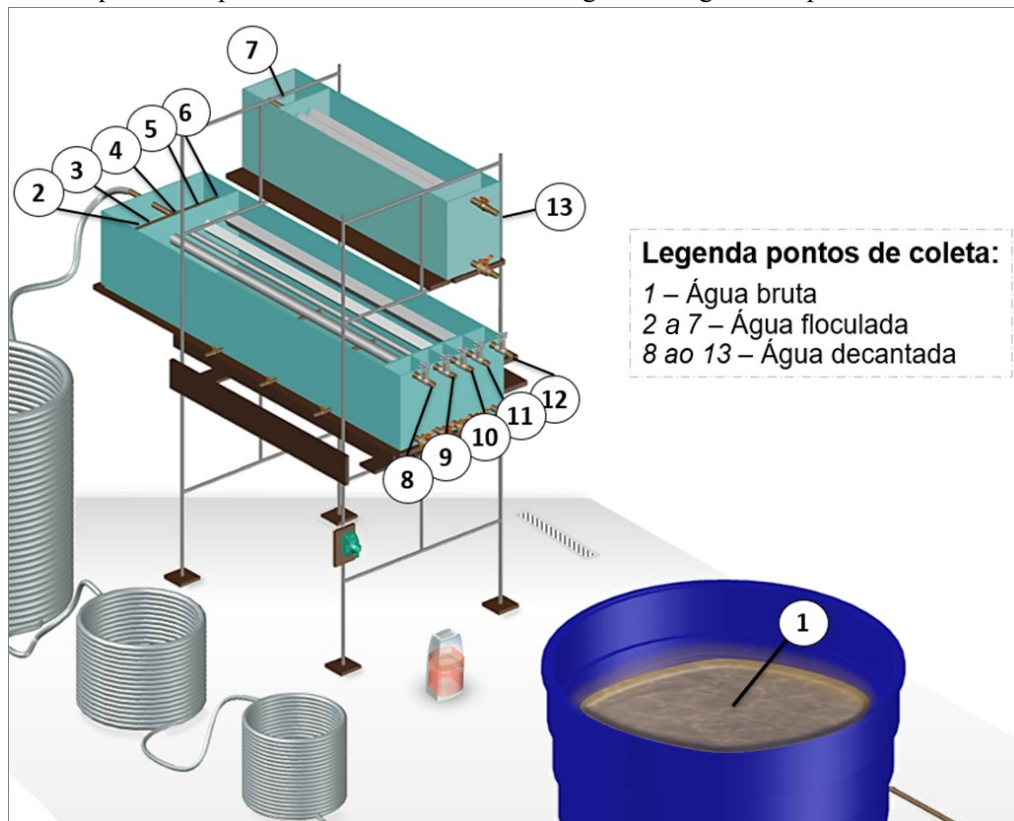
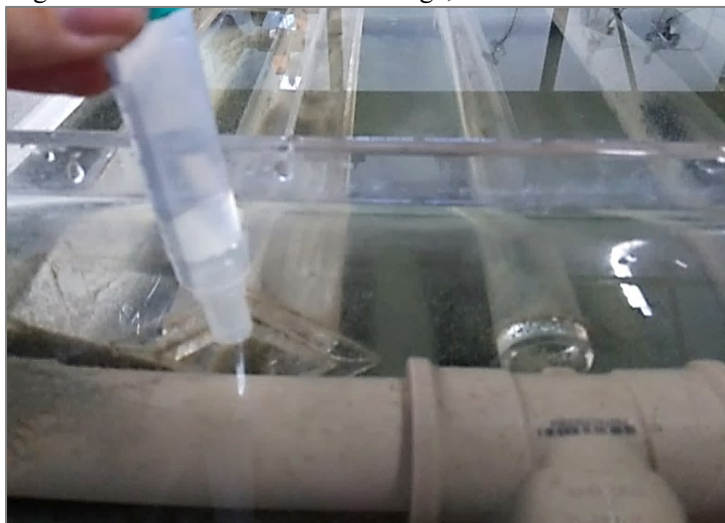


Figura 46 – Coleta da água floculada com auxílio de seringa, em frente à entrada do duto de sedimentação.



4.4 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO DE TESTE DE HIPÓTESE DE MÉDIA

Resumidamente, as etapas utilizadas para proceder com o Teste de Hipóteses são:

- a) estabelecer as hipóteses estatísticas;
- b) determinar a região crítica (se teste é bilateral ou unilateral);
- c) fixar o nível de significância;
- d) determinar o teste de acordo com distribuição e variância;
- e) calcular medida estatística do teste (t observado), para hipótese nula;
- f) estabelecer os critérios (regras) do teste para rejeitar hipótese nula;
- g) calcular a probabilidade de significância (p valor);
- h) aplicação do critério de decisão do teste;
- i) conclusão estatística.

O Teste de Hipóteses é um teste estatístico de inferência que, admitindo um erro de generalização adotado, averigua a veracidade de uma hipótese nula (H_0), onde não há associação entre as variáveis, buscando rejeitá-la. Essa hipótese considera que as médias de dois conjuntos diferentes são iguais estatisticamente. Caso for rejeitada, existe uma hipótese alternativa (H_1), com a associação desejada a se afirmar; a mesma considera que as médias são diferentes (teste bilateral), ou que uma delas é maior ou menor que a outra (teste unilateral).

Qualquer teste estatístico possui um erro intrínseco. A probabilidade do erro tipo I é chamada de nível de significância (α), que é a probabilidade de se rejeitar H_0 quando a

mesma é verdadeira. Ou seja, α é a probabilidade máxima de erro admitida para decidir estatisticamente pela hipótese H1.

Geralmente se adotam valores de α igual a 10%, 5% e 1%. De modo complementar, o nível de confiança (confiabilidade) é igual a $1 - \alpha$. Neste trabalho, adotou-se nível de significância α igual a 1%; e nível de confiança de 99%.

Como há distribuição normal dos dados e a variância populacional (σ^2) é desconhecida, utilizou uma distribuição t de Student.

A medida estatística com distribuição t de Student (t_{obs}), calculada por meio da Equação 12, reflete toda informação amostral observada, permitindo saber quão provável é a hipótese H1.

$$t_{obs} = \frac{\mu_A - \mu_B}{\sqrt{\frac{S_A}{n_A} + \frac{S_B}{n_B}}} \quad (12)$$

Onde t_{obs} = medida estatística dos dados observados na distribuição t-Student s_A^2 e s_B^2 = variância de uma amostra do conjunto A e B, respectivamente; n_A e n_B = número de dados válidos do conjunto A e B, respectivamente; μ_A e μ_B = média do conjunto amostral A e B, respectivamente.

O intervalo de confiança da curva de probabilidade t de Student é calculado a partir do α e grau de liberdade (GL) referente aos dados, cujo valor é calculado conforme a Equação 13. Esse intervalo pode ser calculado com funções do programa *Excel* (função Inv.t), para encontrar o(s) ponto(s) crítico(s) que delimita(m) o mesmo.

$$GL_i = n_i - 1 \quad (13)$$

Onde GL_i = graus de liberdade de uma amostra; n_i = tamanho da amostra.

Se a medida estatística (t_{obs}) estiver dentro do intervalo de confiança, não se deve rejeitar a hipótese H0, mas também não se deve afirmá-la (que há ausência de influência entre as variáveis), somente não se comprova H1, para a confiabilidade adotada no teste. Quando t_{obs} ficar fora desse intervalo pode-se afirmar que a Hipótese H1 é verdadeira com a confiabilidade admitida no teste.

A probabilidade de significância do teste (pvalor), que é a chance de errar ao decidir por H1, é calculada no *Excel* (função Dist.t) a partir dos graus de liberdade (GL) e a medida estatística (t_{obs}), com base na distribuição t de Student.

Comparando o pvalor e α , se tem outra maneira de chegar na hipótese H0 ou H1. Geralmente utilizam-se as seguintes regras:

- a) se $p\text{-valor} \leq \alpha$ então H_1 , caso contrário H_0 (teste unilateral); ou
 b) se $p\text{-valor} \leq \alpha/2$ então H_1 , caso contrário H_0 (teste bilateral).

A conclusão estatística é uma exposição sobre a decisão por H_0 ou de H_1 sempre informando o nível de significância α adotado na pesquisa.

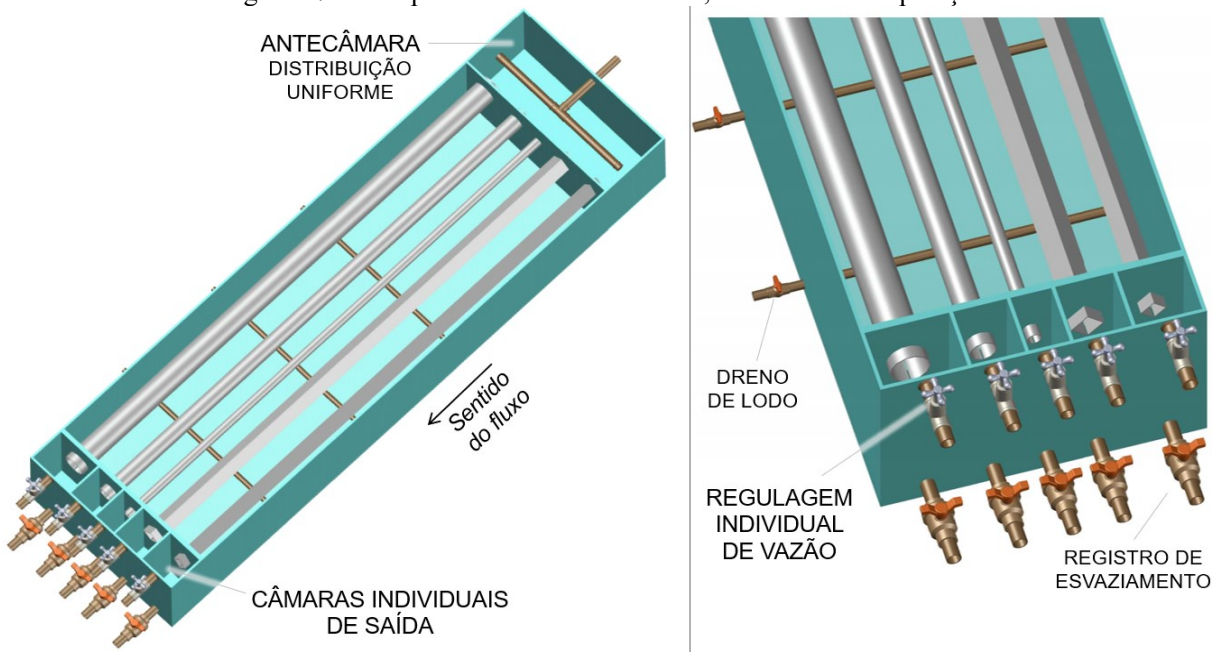
Portanto, esse teste se propõe a encontrar um padrão de associação entre duas variáveis (comparação bivariada), sendo ideal para quando uma variável é qualitativa, que neste estudo são cada duto, e a outra variável é quantitativa contínua, que no caso são os dados de eficiência e taxa de escoamento superficial.

4.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS (FASE I – ETAPA 1)

4.5.1 Operação do Sistema Piloto

Na Fase I, o sistema piloto foi operado com uma vazão média de 1,9 L/min no misturador rápido, floculador e Decantador 1. Na Etapa 1 desta fase, todos os dutos horizontais do decantador funcionaram simultaneamente, sendo a vazão total distribuída de forma proporcional ao tamanho dos dutos, regulada através de registros de pressão situados na saída das câmaras individuais (Figura 47).

Figura 47 – Componentes do Decantador 1, relacionados a operação.



Com o intuito de fixar o máximo de variáveis operacionais e comparar a influência apenas da distância vertical e do formato da seção transversal do duto na eficiência de

remoção, durante as operações, manteve-se a mesma velocidade longitudinal em todos os dutos. Assim como, manteve-se mesma velocidade de sedimentação característica dos flocos, pois era distribuída a mesma água floculada, e, portanto, mesmas condições de pH e temperatura da água floculada em cada experimento.

A vazão em cada duto foi o produto entre a velocidade longitudinal comum (fixada em 38,5 cm/min) e área da seção transversal de cada duto, sendo regulada por meio de registros localizados nas câmaras individuais de saída de água decantada.

A eficiência de remoção de sólidos foi realizada com a análise dos parâmetros turbidez e cor aparente da água decantada em relação aos mesmos parâmetros da água floculada (eficiência do decantador) ou em relação aos da água bruta (eficiência do sistema).

O tempo de operação realizando as coletas de dados nessa etapa foi de 2h15min, a fim de que cada experimento totalizasse em 10 amostras para cada ponto de coleta. A cada 15 min eram coletadas amostras da água floculada na entrada de cada duto, e da água decantada no tubo de saída de cada câmara individual de saída. Nesse intervalo, eram realizadas as análises de cor aparente e turbidez referente às amostras de água floculada e decantada de cada duto.

A aferição de turbidez, cor aparente, cor verdadeira da água bruta era realizada 1x por operação, visto que se mantinha os parâmetros ao longo do experimento devido à recirculação de água no reservatório de água bruta. A medição de cor verdadeira servia apenas para padronização mais precisa da água bruta em todos os experimentos.

As vazões individuais dos dutos foram medidas de 15 em 15 min, para aferir se estavam iguais ou próximas das vazões pré-estabelecidas. Essas vazões individuais foram calculadas pelo produto da velocidade de escoamento longitudinal adotada e da área da seção conhecida para cada duto (no item 4.2.3.2.1).

Complementarmente, foram aferidos o pH e a temperatura da água bruta, floculada e decantada em três momentos ao longo da operação (início, meio e fim).

A operação descrita nesse item foi repetida 27 vezes, havendo limpeza do lodo que porventura ficasse acumulado no interior dos dutos e na antecâmara entre as operações.

Ao final de cada experimento, realizou-se a medição da distância longitudinal máxima (alcance) de lodo acumulado no fundo dos dutos. Com essa informação, verificou-se o comprimento real necessário de cada duto para a sedimentação das partículas, permitindo relacioná-los com a geometria da seção e a eficiência de remoção de sólidos.

Como a distância máxima na qual os flocos visualmente alcançaram no interior de cada duto foi considerada o comprimento necessário de sedimentação, calculou-se a taxa de

escoamento superficial possível para cada duto (Equação 9), agora com os novos comprimentos determinados por observação, os quais modificaram a área de sedimentação de cada duto.

4.5.2 Análise Descritiva e Inferência Estatística

Para determinar a influência do tamanho da seção dos dutos na eficiência de decantação, primeiramente foram separados dois grupos de dutos de acordo com o formato (circular e losangular). Feito isso, comparou-se a influência do diâmetro dos dutos circulares 1, 2 e 3 (21, 34 e 54 mm) na eficiência; e a influência da diagonal vertical dos dutos losangulares 4 e 5 (39 e 35 mm) na eficiência. Vale lembrar que os dutos 4 e 5 possuem seção com mesmos ângulos, que formam 45° com o eixo horizontal, ou seja, mesmo formato.

Por sua vez, para determinar a influência do formato da seção na eficiência de decantação, comparou-se os dutos 2 e 5, ou seja, o duto circular (diâmetro 34 mm) e losangular (lado 25 mm). Ambos foram escolhidos, pois as distâncias verticais a ser percorrida pelos flocos no interior do duto são praticamente iguais (duto circular = 34 mm e losangular = 35 mm).

Nessa etapa, foi realizada, com auxílio do *software Statistica*, uma análise estatística descritiva dos dados obtidos em relação à turbidez, cor aparente e eficiência do decantador. Dessa forma, para compreender melhor a dispersão dos dados, identificar valores discrepantes e comparar os resultados de acordo com os objetivos relacionados, foram elaborados: tabela com medidas de tendência central, histogramas de frequência, diagramas de dispersão e diagramas de caixas.

Vale citar que em todos os diagramas de caixas deste trabalho utilizou-se um limite de detecção de *outliers* igual ao produto entre um fator de 2,5 e o intervalo interquartil. Isso significa que foram considerados 95% dos dados, sendo os 2,5% dos valores superiores e inferiores a esse intervalo, *outliers*. O parâmetro para identificação de valores extremos foi 3 vezes o intervalo interquartil.

Primeiramente, foram analisados os dados brutos, identificando os potenciais valores discrepantes. Em seguida, esses valores foram avaliados, com a verificação de possíveis erros de entrada e de qual dia de operação eram provenientes. As operações cuja maioria dos dados eram discrepantes foram excluídas, consideradas eventos anormais. Só então repetiu-se a análise estatística dos dados já tratados.

O Teste de Hipóteses foi definido como unilateral à direita, com ponto crítico t_α . Desse modo, o nível de significância α é igual a $t_{\text{obs}} > t_\alpha$ e o intervalo de confiança é $t_{\text{obs}} \leq t_\alpha$.

Tal que é analisado a probabilidade de a medida estatística estar fora do intervalo de confiança, ou seja, $t_{obs} > t_{\alpha}$, para um grau de liberdade GL, a fim de afirmar H1.

Adotou-se um nível de significância α de 1% para o teste, sendo formuladas as seguintes hipóteses:

- a) H0: A média da eficiência de remoção de sólidos do Duto A não é estatisticamente superior ou igual à média do Duto B, ou seja, $\mu_{EA} \leq \mu_{EB}$;
- b) H1: A média da eficiência de remoção de sólidos do Duto A é estatisticamente superior à média do Duto B, ou seja, $\mu_{EA} > \mu_{EB}$.

No caso, a remoção de sólidos se refere à eficiência de remoção de turbidez e cor aparente por meio da decantação. Cada parâmetro teve sua análise estatística.

Os dados de eficiência relativos aos dutos foram comparados em pares. Sendo que sempre foi verificado se a média da eficiência do Duto B é significativamente maior do que a eficiência do Duto A (para $\alpha = 1\%$). Portanto, colocou-se sempre no posto do Duto B os dutos que se esperava obter maior eficiência em relação ao A.

A fim de definir estatisticamente a influência do formato da seção do duto na eficiência do decantador, comparou-se o par de dutos do Quadro 2. O intuito é comprovar que utilizar o duto de seção losangular ao invés de circular, aumenta a eficiência do decantador.

Quadro 2 – Par comparado no Teste de Hipóteses teste, para verificar a influência do formato da seção na eficiência, bem como o motivo de comparação.

Duto A	Duto B	Motivo
Duto 5 \diamond	Duto 2 \circ	Mudança de formato da seção

Para determinar estatisticamente a influência do tamanho da seção do duto na eficiência do decantador, foram feitas as combinações constantes no Quadro 3. Pretende-se comprovar que quanto menor o tamanho da seção do duto, maior a eficiência. Separados em dois grupos devido ao diferente formato, os dutos 1, 2, 3 (Grupo 1) e 4 e 5 (Grupo 2) podem assumir o posto de Duto A e Duto B. A comparação entre os tamanhos dos dutos foi feita entre os diâmetros, no caso do Grupo 1, e entre as alturas verticais, no caso do Grupo 2.

Quadro 3 – Descrição dos pares comparados no Teste de Hipóteses para verificar a influência do tamanho da seção na eficiência, assim como o motivo de comparação.

Grupo	Duto A	Duto B	Diferença entre tamanhos	Motivo
1	Duto 3 \circ	Duto 1 \circ	54 – 21 = 33 mm	Mudança maior de tamanho
	Duto 2 \circ	Duto 1 \circ	54 – 34 = 20 mm	Mudança de tamanho
	Duto 3 \circ	Duto 2 \circ	34 – 21 = 13 mm	Mudança sutil de tamanho
2	Duto 5 \diamond	Duto 4 \diamond	39 – 35 = 4 mm	Mudança muito sutil de tamanho

Calculados os parâmetros necessários descritos no item 4.3, se o p valor $\leq \alpha$, pode-se afirmar H1 (rejeitar H0), pois t_{obs} ficou fora do intervalo de confiança. Se p valor $> \alpha$, não se pode rejeitar H0, nem a afirmar.

Caso resultar em H0, não se pode rejeitar essa hipótese. Já se resultar em H1, afirma-se que a média da eficiência do Duto A é significativamente maior do que a eficiência do Duto B, para nível de significância α de 1%.

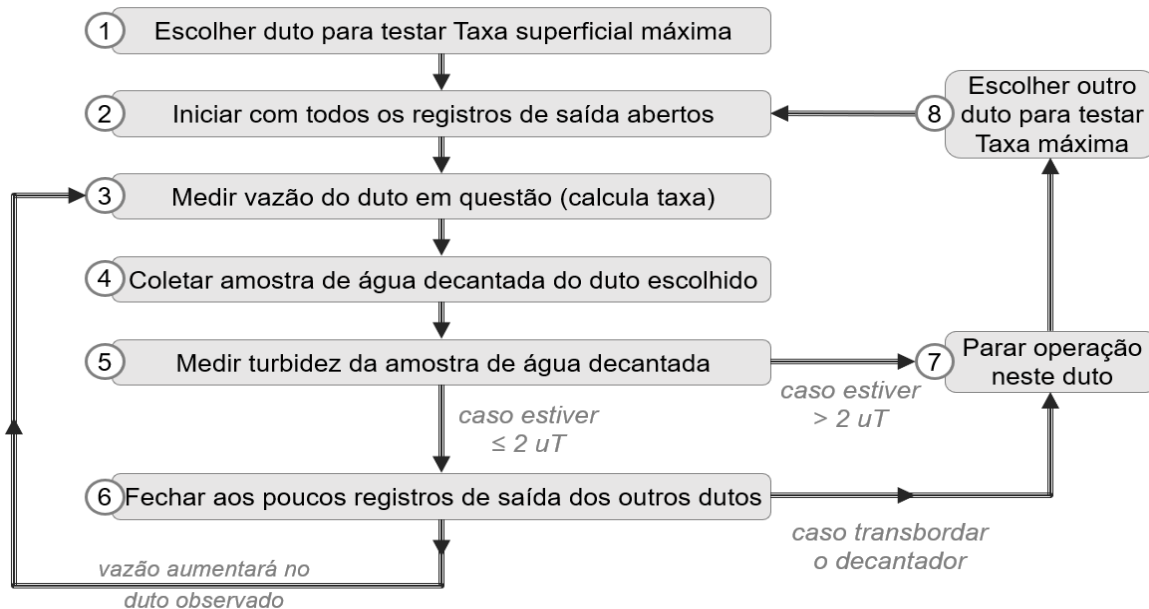
4.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA TAXA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL MÁXIMA ADMISSÍVEL (FASE I – ETAPA 2)

4.6.1 Operação do Sistema Piloto

Na Etapa 2 os dutos horizontais foram analisados separadamente, com a operação da vazão máxima admitida em um duto em seguida do outro. Iniciava-se operando todos juntos, com a vazão plena sendo distribuída em todos e, à medida que se desejava aumentar a vazão no duto analisado, fechavam-se os registros de saída dos outros dutos.

Assim, com o objetivo de atingir a taxa de escoamento superficial máxima admitida em cada duto, procedeu-se a operação do Decantador 1 seguindo o fluxograma da Figura 48.

Figura 48 – Sequência metodológica para operação do Decantador 1 na Etapa 2, Fase I.



O esquema da Figura 48 representa um dia de operação, onde se repetia a sequência descrita para cada duto. Ao parar a operação em um duto, esperava-se regularizar a vazão com todos registros de saída abertos, e então prosseguia o processo para outro duto, até finalizar a análise de todos.

De acordo com a sequência (Figura 48), há dois fatores limitantes que determinam a parada da operação no duto analisado: quando a turbidez da água decantada ultrapassar 2 uT (adotado como máximo ideal) ou quando ocorrer o extravasamento do decantador. O valor da vazão máxima alcançada no momento da parada foi o utilizado para calcular a taxa máxima admissível no duto analisado.

O transbordamento da unidade ocorria devido ao aumento de vazão passando por um único registro, o que fazia aumentar a perda de carga e, conseqüentemente, o nível d'água no interior do decantador, até ultrapassar a borda livre disponível.

O tempo de operação foi de cerca de 5h20min em contínuo, visto que os resultados da taxa máxima dos dutos foram obtidos um após o outro, ao longo do tempo.

A amostragem da água floculada e decantada foi feita com um intervalo de tempo menor possível, entre 5 a 10 min, somente o suficiente para análise de turbidez e cor aparente das amostras coletadas na entrada e saída do duto avaliado. A medição das vazões individuais das saídas dos dutos executou-se com o mesmo intervalo de tempo.

Analogamente à Etapa 1, as análises de turbidez, cor aparente e cor verdadeira da água bruta eram realizadas 1x por operação. Já a frequência de medição do pH e temperatura da água bruta, floculada e decantada (para cada duto) foi menor nessa etapa, 1x por operação.

Nessa etapa, foram realizadas 5 repetições de operação, onde já se percebeu uma constância dos valores máximos atingidos por cada duto. Da mesma forma que na Etapa 1, entre uma operação e outra, era realizada a limpeza da unidade de decantação.

4.6.2 Análise Descritiva e Inferência Estatística

Nesse processo, primeiramente se removeu os valores de turbidez da água decantada que porventura estivessem maiores que 2 uT, assim como os respectivos dados dos outros parâmetros da mesma medição.

Para análise estatística descritiva dos dados de taxa de escoamento superficial obtidos em cada duto na Etapa 2 (Fase I) do experimento, utilizou-se o *software Statistica*, por meio do qual foram construídos: tabela com descrição paramétrica, histogramas de frequência e diagramas de caixas.

Por meio da seleção do maior valor de taxa alcançado em cada duto, foi realizado um ranqueamento das taxas máximas, comparando em uma tabela os resultados obtidos para cada duto.

Para avaliar se existe diferença estatística entre os valores ranqueados, foi executado o Teste de Hipóteses de médias, utilizando apenas os valores máximos de taxa das cinco

operações. Como o número do conjunto amostral foi pequeno (cinco dados de valores máximos para cada duto), os resultados podem conter certa inconsistência, porém é o suficiente para ter-se uma visão geral.

O teste neste caso foi unilateral à direita, com nível de significância igual a 1%, e com base nas seguintes hipóteses:

- a) H0: A média da taxa máxima de escoamento do Duto A não é estatisticamente superior ou igual à média do Duto B, ou seja, $\mu_{qA} \leq \mu_{qB}$.
- b) H1: A média da taxa máxima de escoamento do Duto A é estatisticamente superior à média do Duto B, ou seja, $\mu_{qA} > \mu_{qB}$.

Os dutos foram comparados em pares (A e B), de acordo com o objetivo de verificar a influência formato e tamanho da seção dos dutos na taxa. Para o formato, foi analisado o mesmo par de dutos do Quadro 2, já para o tamanho, foram observados os mesmos pares e critérios do Quadro 3 (item 4.5.2).

Paralelamente, também se elaborou gráficos relacionando a taxa de escoamento superficial e a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente dos dutos. Tais gráficos foram organizados de forma a possibilitar a comparação da influência do tamanho e formato do duto na taxa de escoamento superficial.

4.7 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA (FASE I – ETAPA 1,2 E 3)

4.7.1 Operação do Sistema Piloto

Na Etapa 1 da Fase I, observou-se a capacidade de autolimpeza com os dutos operando simultaneamente, com mesma velocidade de escoamento longitudinal, permitindo a realização de um paralelo melhor da influência do tamanho e formato, pois as condições eram exatamente as mesmas no tempo.

As operações com maior duração foram as da Etapa 2, porém os dutos eram analisados um após o outro e, sempre no início da operação de um duto, fazia-se a limpeza do mesmo com auxílio de um sistema sifão para aspirar os flocos do interior; a fim de que todos comessem limpos na operação da taxa máxima. Assim, a avaliação da capacidade de autolimpeza foi individual para o tempo de operação de cada duto.

Além de observar a autolimpeza na operação da Etapa 1 e 2, executou-se algumas operações com carga elevada de sólidos, sendo chamada de Etapa 3. Através da mudança brusca no registro de ajuste da vazão do sistema, provocou-se uma descarga de sólidos no

sistema, provenientes de flocos incrustados no floculador e tubulações anteriores ao decantador. Vale ressaltar que, em seguida desta manobra no registro, a vazão era regulada para 1,9 L/min, e só após a regularização, era iniciada a observação do comportamento dos flocos.

A Etapa 3 teve início após operações da Etapa 1 e 2, quando os dutos de sedimentação já tinham funcionado por algum período. Essa etapa teve duração variável (dependendo da duração da descarga de sólidos provocada) e analisou-se apenas o fator autolimpeza, ignorando os dados para cálculo da eficiência e taxa de escoamento superficial. Após o término de alguma operação referente à Etapa 3, era realizada a limpeza dos dutos de sedimentação.

4.7.2 Análise Descritiva

Analisou-se de maneira visual no Decantador 1 os critérios para indicar a capacidade de autolimpeza, os quais estão descritos no Quadro 4. Para auxiliar na verificação dos critérios, foram feitos fotos e vídeos diários do comportamento dos flocos ao longo da operação desta unidade.

A influência do tamanho e formato na autolimpeza, portanto foi de modo principalmente visual.

Quadro 4 – Critérios adotados para avaliar a capacidade de autolimpeza dos dutos de sedimentação.

Critérios de avaliação da capacidade de autolimpeza	
Análise visual para verificar se:	1. Flocos que saem pela abertura inferior de um duto entram no mesmo duto em outro ponto dessa abertura;
	2. Flocos que saem pela abertura inferior de um duto entram pela abertura de outro duto;
	3. Forma camada de lodo no perímetro da seção, ao longo da superfície interna do duto (sem considerar o acúmulo de lodo no fundo);
	4. Ocorre acúmulo de lodo no fundo do duto nas proximidades da abertura longitudinal inferior;
	5. Há obstrução total da seção transversal dos dutos;
	6. Flocos se acumulam e impedem (obstruem) a passagem dos demais flocos pela abertura longitudinal inferior;
	7. Floco que já sedimentou no interior do duto ressuspende pelo fluxo de água;
	8. Há facilidade de deslizamento do lodo na superfície interna inferior do duto;
Cálculo para verificar:	9. A relação entre o tamanho da seção transversal do duto e da abertura longitudinal inferior;
	10. N° de Reynolds na zona dentro do decantador é laminar, ou seja, se oferece condições ideais para sedimentação no interior do duto.

O critério 9 do Quadro 1 foi calculado utilizando as Equações 14 e 15, a primeira relacionada às dimensões lineares e a segunda em relação à área.

$$R = \frac{dh}{e_a} \quad (14)$$

Onde R = relação entre dimensão do duto e da abertura longitudinal inferior (adim.), dh = diâmetro ou diagonal horizontal do duto (mm), e_a = largura da abertura inferior (mm).

$$Ra = \frac{A_a}{A_d} \quad (14)$$

Onde Ra = relação entre as áreas da seção do duto e da abertura longitudinal inferior (m^{-1}), A_a = área da abertura longitudinal inferior do duto por metro linear (cm^2/m), A_d = área da seção transversal do duto (cm^2).

Já o critério 10 foi calculado de acordo com a Equação 11, presente no item 4.2.3.2.1 deste trabalho. O fluxo laminar também deve ocorrer após a saída dos flocos através da abertura inferior de um duto, portanto, também foi verificado se, visualmente, era formada alguma corrente no interior do decantador; que ocasionasse alguma turbulência nos flocos ou ressuspensão do lodo sedimentado no fundo do decantador.

4.8 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1)

4.8.1 Operação do Sistema Piloto

As unidades do sistema piloto 2 operaram com uma vazão média de 1,9 L/min nessa fase. Para avaliar a eficiência do Decantador 2 quanto à remoção de sólidos suspensos, comparou-se a qualidade da água afluyente e efluente.

Durante a operação da unidade, foram coletadas amostras de água floculada e decantada a cada 10 min, para medição de turbidez e cor aparente. A amostragem na entrada e na saída dos dutos foi composta, com a coleta de 9 alíquotas (uma para cada duto) para compor uma única amostra.

As análises de turbidez, cor aparente e cor verdadeira da água bruta eram realizadas apenas 1x por operação. As operações tinham uma duração de 2h00, portanto, resultavam em 13 amostras por ponto de coleta. Obteve-se 10 operações úteis no total dessa fase.

4.8.2 Análise Estatística Descritiva

Foi feita uma análise estatística descritiva univariada dos dados obtidos com o uso do *software Statistica*. Por meio do mesmo foram gerados diagramas de frequência e de caixas,

assim como gráficos complementares, sobre a eficiência de remoção de sólidos e a taxa de escoamento superficial obtidas nesta unidade piloto.

4.9 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1 E 2)

4.9.1 Operação do Sistema Piloto

Durante toda a Etapa 1, na qual analisou-se a eficiência de remoção de sólidos, igualmente se observou de modo visual a capacidade de autolimpeza do arranjo de dutos. Porém, além disso, operou-se de modo diferente em uma segunda etapa: lançando uma carga elevada de sólidos no Decantador 2, a fim de não necessitar operar o sistema muitas horas seguidas. Foram duas operações com duração média de 1h30.

Esse modo de operação, exclusivo da Etapa 2, destinou-se apenas à observação da autolimpeza. A descarga de sólidos no sistema ocorreu também com o movimento brusco do registro de regulagem da vazão do sistema, retornando logo após à vazão de 1,9 L/min.

4.9.2 Análise Descritiva

A capacidade de autolimpeza do arranjo de dutos foi analisada de forma visual, mediante as operações realizadas na Fase II. Do mesmo modo que para o Decantador 1, o comportamento dos flocos no Decantador 2 foi observado, filmado e fotografado a cada dia de operação, formando um acervo para análise e posterior descrição.

Para avaliação da capacidade de autolimpeza, além dos critérios de avaliação do Quadro 4, foi analisado um fator a mais: o comportamento dos flocos entre os perfis de dutos e seu deslizamento na superfície inclinada externa dos dutos.

4.10 EXTRAPOLAÇÃO PARA ESCALA REAL

A extrapolação da conformação interna desenvolvida para a nova concepção foi realizada em dois aspectos: primeiramente mantendo a área superficial de sedimentação dos decantadores construídos em escala piloto e aumentando a quantidade de camadas sobrepostas para atingir uma taxa elevada; e o outro aspecto foi realizando dimensionamentos com proporções mais próximas dos decantadores de alta taxa em escala real, para comparar com um decantador existente o tamanho da unidade e a taxa admitida.

4.10.1 Mantendo Área Superficial de Sedimentação dos Decantadores em Escala Piloto

A área superficial do Decantador 1 e Decantador 2 foram iguais a $0,70 \text{ m}^2$ (soma das áreas superficiais de todos os dutos) e $0,17 \text{ m}^2$ (9 dutos vistos de cima). Com isso, as taxas de escoamento superficial dos Decantadores 1 e 2 foram iguais a 10,3 e $15,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, respectivamente (Equação 9), para uma vazão de 1,9 L/min. Esses valores são muito inferiores às taxas encontradas na literatura (180 a $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$), pois se construiu propositalmente poucos dutos organizados em camadas sobrepostas, não havendo elevada área de contato para mesma área superficial de sedimentação.

A obtenção de uma taxa de escoamento superficial mais próxima da literatura pode ser adquirida por extrapolação da situação em escala piloto, aumentando a quantidade de camadas sobrepostas de dutos em mesma área superficial.

Desta maneira, foi determinado o procedimento de cálculo da altura dos decantadores construídos em escala piloto, para que seja possível tratar com uma taxa de decantador de alta taxa, de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, mantendo a área superficial de sedimentação e o comprimento dos dutos da escala piloto.

Assim, considerando essa situação hipotética, adotou-se os parâmetros da Tabela 7 para obter a dimensão da profundidade para a taxa aplicada comumente em decantadores de escala real.

Tabela 7 – Parâmetros adotados para o extrapolemanto das unidades piloto.

Parâmetros adotados	Valor
Taxa de escoamento superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)	240
Espaçamento entre dutos no eixo vertical e horizontal (cm)	2
Altura mínima de água sobre os dutos afogados (cm)	10
Borda livre (cm)	15
Distância entre última camada de duto e início fundo piramidal (cm)	10
Profundidade da zona de lodo (cm)	50
Largura canal de água decantada (cm)	40
Espessura das paredes do decantador (cm)	3

4.10.2 Adotando Medidas Próximas aos Decantadores em Escala Real

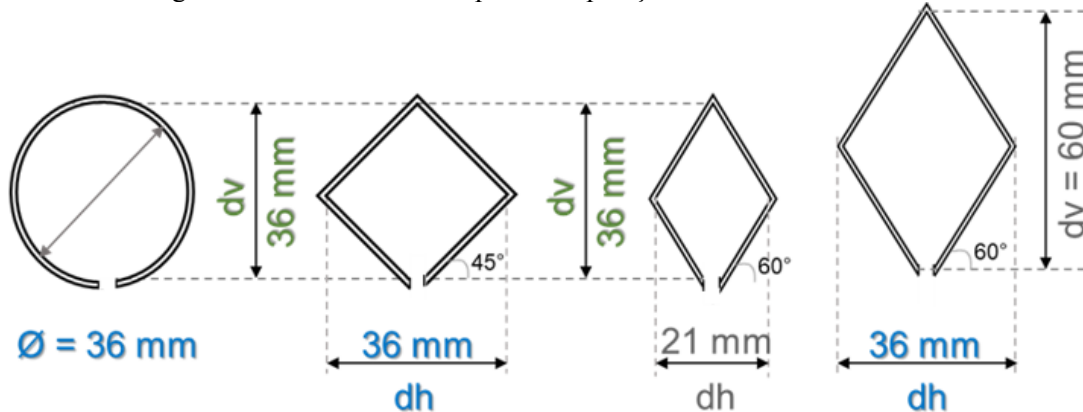
Nesta etapa foram utilizadas dimensões mais próximas da realidade, extrapolando o modelo *MLSens* para a mesma área superficial de sedimentação e altura de um decantador de alta taxa de placas inclinadas existente, a fim de comparar a vazão capaz de ser tratada em ambos em um primeiro cenário.

Em um segundo cenário, foi realizado o extrapolamento considerando mesma vazão e altura do decantador de alta taxa existente escolhido para o exemplo, deixando livre as demais dimensões, para comparar a área superficial de sedimentação entre ambos. A taxa resultante nos decantadores tipo *MLSens* e no decantador de placas inclinadas foi comparada, para os dois cenários descritos, a fim de determinar a maior.

A extrapolação foi realizada para três formatos da seção dos dutos do tipo *MLSens*: circular, losangular 45° e losangular 60°. O tamanho e formato escolhidos se assemelham ao Duto 2, Duto 5, (circular e losangular do Decantador 1) e aos dutos do Decantador 2, respectivamente.

Na Figura 49, foram representados os três formatos de dutos, com dois tamanhos do duto losangular 60°, para se igualar ora com a distância horizontal da seção transversal dos demais, ora com a distância vertical da seção transversal dos demais dutos.

Figura 49 – Dutos utilizados para extrapolação do decantador *MLSens*.



Para compará-los em escala real, foi determinado duas situações:

- os três dutos possuem a seção transversal com mesma distância horizontal (dh), de 36 mm. Nessa situação, cabem a mesma quantidade de dutos justapostos na largura do decantador;
- os três dutos possuem a seção transversal com mesma distância vertical (dv), igual a 36 mm. Nessa situação, cabem a mesma quantidade de dutos sobrepostos no decantador, isto é, apresenta-se a mesma altura total de dutos.

O duto circular e o losango 45°, cada um, possui distância horizontal e vertical da seção iguais. Sendo assim, para a segunda situação, foi necessário refazer essa extrapolação apenas para o duto losangular 60°, modificando a diagonal vertical do mesmo para 36 mm.

Para se ter um parâmetro de comparação, utilizou-se as dimensões de um decantador existente. Optou-se por coletar as informações de uma ETA convencional, cuja vazão nominal

é de 2000 L/s, distribuída em 16 decantadores de alta taxa, do tipo placas paralelas. Portanto, um decantador que trata com uma vazão nominal de 125 L/s.

Na elaboração dos layouts em escala real da nova concepção, foram simulados dois cenários para uma unidade de decantação com arranjo de dutos contendo abertura longitudinal inferior:

- a) **Cenário 1:** Tratar uma vazão de projeto de 125 L/s e atingir uma taxa de escoamento superficial igual a $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, a fim de obter como resultado as dimensões e compará-las com as do existente;
- b) **Cenário 2:** Tratar uma vazão de projeto igual a 125 L/s, fixando a mesma altura total do decantador existente (5,2 m), para ter como resultado a taxa de escoamento superficial.

Para considerar uma condição mais desfavorável para a nova concepção de decantador, ou seja, uma condição superdimensionada, adotou-se uma velocidade longitudinal de 40 cm/min (máxima encontrada na literatura) para proceder com os cálculos. Uma v_0 elevada exige um decantador de maiores dimensões, por isso, desfavorece a tecnologia, porém testa sua capacidade de superar os decantadores existentes. A velocidade de sedimentação adotada foi de 1,25 cm/min (18 m/d).

Durante a elaboração dos layouts do arranjo de dutos em escala real, foram desenvolvidas as equações para o dimensionamento da unidade de decantação, considerando as condições supracitadas nos cenários propostos. Tal dimensionamento foi feito tanto para projetar um decantador inexistente, quanto para adaptar um decantador existente à nova concepção.

As equações foram universalizadas para os diferentes formatos e tamanhos de dutos. Essas fórmulas surgiram a partir de observação da trigonometria dos arranjos de dutos desenvolvidos, atentando para o espaçamento entre as fileiras de dutos, a espessura da parede do duto, o número de dutos em linha e em coluna, o alinhamento dos dutos com a parede do decantador, a distância horizontal e vertical da seção do duto, entre outros fatores.

5 RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A COGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Nesse tópico, será discutido brevemente as etapas prévias de tratamento coagulação e floculação apenas nos quesitos em que influenciaram de forma negativa no desempenho eficaz da decantação.

Além das 42 operações realizadas com ambos os decantadores em escala piloto, considerando todas as fases do experimento, em torno de 8 operações foram canceladas devido à má coagulação e floculação da água. Nessas ocasiões, normalmente o resultado prévio do *Jartest* também não era satisfatório (turbidez remanescente acima de 5 uT), o que se confirmava na operação do sistema piloto.

Nessas operações, a formação dos flocos era prejudicada por algum fator externo. Visualmente, era possível verificar que a água floculada chegava com pequenos flocos na antecâmara do decantador ou, por vezes, possuía uma coloração acastanhada, de elevada cor verdadeira (próxima à da água bruta).

O motivo provavelmente foi devido à variação existente da qualidade do coagulante PAC após certo período de tempo; visto que o produto obtido devia ser utilizado em até dois meses, aproximadamente, pois era fornecido por estações de tratamento que o armazenavam há algum tempo.

Outro motivo pode ter sido a temperatura ambiente, nos dias mais frios, com temperatura da água bruta em geral menor que 19°C, a água floculada visualmente apresentou maior cor verdadeira. Destaca-se que o controle da temperatura foi impossibilitado em alguns momentos, especialmente nos dias mais frios do inverno.

A temperatura influencia na densidade da água, e, portanto, modificam-se os gradientes da mistura rápida e floculação. Além disso, nos casos em que a temperatura da água nessas etapas prévias era muito diferente da temperatura da água que já estava no decantador, ocorriam correntes de densidade no mesmo. Todas essas ocorrências foram descartadas da análise final dos resultados, pois também não havia boa formação de flocos.

A turbidez da água floculada em geral foi menor do que a da água bruta, devido a sedimentação de flocos no floculador tubular helicoidal, mais especificamente no terceiro trecho em série. Isso ocorreu devido à velocidade da água floculada nesse trecho ser igual a 0,06 m/s, inferior à velocidade mínima recomendada por Azevedo Netto (1976) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017), de 0,15 m/s e 0,10 m/s, respectivamente, para os flocos

não sedimentarem já no floclador. Como as mangueiras que formavam o floclador eram transparentes, notou-se visualmente um acúmulo de lodo no interior do terceiro trecho.

Os dois primeiros trechos do floclador apresentaram uma velocidade no tubo de 0,23 e 0,10 m/s, respectivamente, igual ou superior ao recomendado por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) e visualmente não foi constatado acúmulo de lodo.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO DECANTADOR *MLSens*

5.2.1 Decantador em Escala Piloto 1

Nesse tópico, foram expostos os resultados do dimensionamento realizado para determinar o comprimento total (dh_L) dos dutos e a vazão total (Q_{dec}) do Decantador 1. Além disso, discutiu-se algumas condições operacionais que influenciaram no desempenho desse decantador.

Considerando a velocidade de escoamento longitudinal igual a 38,5 cm/min e a velocidade de sedimentação igual a 1,45 cm/min, ao aplicar a Equação 6, obteve-se um comprimento relativo (L_r) igual a 26,6, próximo ao indicado como valor adequado por Yao (1970), isto é, entre 20 e 40, e preferencialmente próximo de 20. A partir do L_r , calculou-se o comprimento dos dutos (Equação 7). A Tabela 8 evidencia os valores medidos referentes à distância vertical da seção dos dutos (dv_T), bem como os valores calculados da distância a ser percorrida longitudinalmente no interior do duto (dh_L).

Tabela 8 – Distância vertical de cada duto, de acordo com sua geometria, e comprimento necessário para o floco ser removido em cada duto do Decantador 1, para um $L_r = 26,6$.

Duto	Distância vertical – dv_T (mm)	Distância horizontal – dh_L (cm)
1 - Circular maior	54	144
2 - Circular médio	34	90
3 - Circular menor	21	56
4 - Losangular maior	39	105
5 - Losangular menor	35	96

Tendo em vista a Tabela 8, o comprimento da zona de sedimentação do Decantador 1 foi fixado igual ao maior valor, ou seja, igual ao dh_L do maior duto circular: 144 cm.

A fim de compreender melhor o que significou fixar o comprimento igual para todos os dutos, a partir de dv_T e dh_L recalculou-se o L_r e v_0 na Tabela 9, para visualizar a velocidade do fluxo possível de aplicar em cada duto, considerando a mesma velocidade de sedimentação.

Fazendo um adendo quanto à velocidade de sedimentação, a mesma foi determinada nos ensaios de tratabilidade e resultou em média 1,45 cm/min, para uma turbidez remanescente menor que 2 uT, ou seja, a mesma adotada no dimensionamento (1,45 cm/min). Os valores recalculados na Tabela 9 consideram essa velocidade determinada nos ensaios.

Tabela 9 – Comprimento relativo recalculado, considerando as distâncias verticais e longitudinais que o floco deve percorrer em cada duto para ser removido e a velocidade longitudinal que poderia ser atingida a partir desses Lr.

Duto	Lr recalculado	v₀ possível (cm/min)
1 - Circular maior	27	40,0
2 - Circular médio	42	63,5
3 - Circular menor	69	102,9
4 - Losangular maior	37	56,1
5 - Losangular menor	42	62,6

Observa-se na Tabela 9 que é possível assumir uma velocidade longitudinal no Duto 3 consideravelmente superior aos outros dutos, o que é um indicativo de que o menor tamanho da seção deveria demonstrar melhores resultados de eficiência quando se aplica a mesma velocidade longitudinal; visto que possui menor distância vertical para o floco percorrer.

Portanto, a fixação do comprimento e das velocidades foram justamente para mostrar a influência do tamanho da seção no caso dos dutos com abertura inferior. Assim como, para analisar a influência do formato da seção do duto no desempenho do decantador, visto que a velocidade passível nos dutos 2 e 5 são similares (pois altura a ser percorrida dentro de ambos os dutos é parecida).

No item 4.2.3.2.1 foi explicado que se adotou velocidade de escoamento longitudinal elevada e velocidade de sedimentação pequena, de acordo com a literatura, para o dimensionamento do Decantador 1. Dimensionar para uma condição ruim de operação é desfavorável para mostrar o potencial da tecnologia, pois se construiu um decantador com comprimento “maior do que o necessário”, com maior área superficial de sedimentação que se necessitaria. Porém, é favorável para a eficiência do decantador. Para fins de avaliar inicialmente a tecnologia do Decantador *MLSens*, considerou-se suficientes as unidades piloto testadas, porém ainda há muito potencial para ser desenvolvido em relação a esta nova concepção.

Na Tabela 10, constam os valores das áreas da seção, as características da seção a partir das quais foram calculadas, e as vazões individuais calculadas para os dutos. Essas

vazões foram as reguladas nos registros de saída durante as operações da Etapa 1, com intuito de se manter a mesma velocidade longitudinal no interior dos dutos.

Tabela 10 – Área e vazão individual dos dutos do Decantador 1, para velocidade de escoamento longitudinal nos dutos igual a 38,5 cm/min.

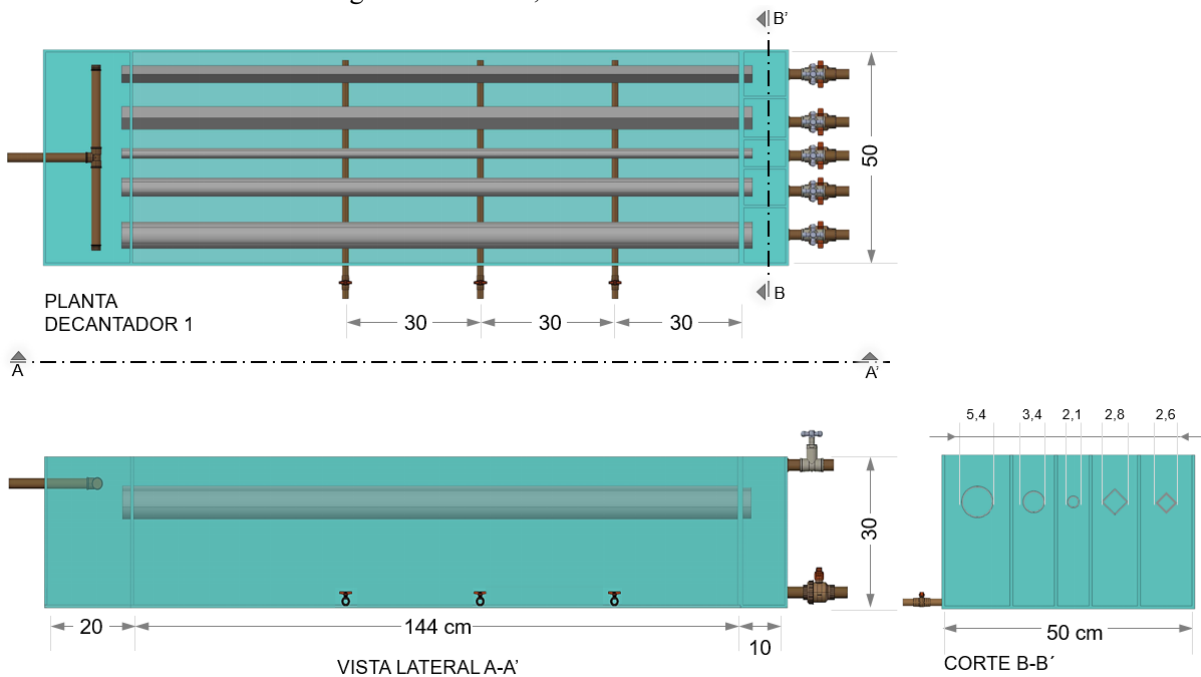
Duto	Diâmetro ou diagonal (cm)	Área da seção transversal (cm ²)	Vazão no duto (L/min)
○ 1	5,40	22,9	0,88
○ 2	3,40	9,1	0,35
◦ 3	2,10	3,5	0,13
◇ 4	dv = 3,9 e dh = 3,9	7,6	0,29
◇ 5	dv = 3,5 e dh = 3,5	6,2	0,24

A vazão total do sistema foi igual à soma das vazões de cada duto do Decantador 1, cujo valor resultou em 1,9 L/min.

A soma dos valores dos diâmetros e diagonais horizontais dos dutos, das espessuras dos mesmos e do espaçamento de 5 cm entre os mesmos resultou no valor aproximado de 50 cm para largura do decantador.

A Figura 50 ilustra as dimensões finais do Decantador 1 por meio de um desenho em planta, vista lateral e corte, com medidas em centímetros.

Figura 50 – Planta, vista e corte do Decantador 1.



No tocante à distribuição da água floculada para os dutos de sedimentação, vale ressaltar que, durante a Etapa 1, houve uma mudança no dispositivo responsável por esta função. O tê perfurado (Figura 51), instalado nas primeiras operações, apresentava a problemática de a maioria dos flocos sedimentar na antecâmara, antes de adentrar nos dutos. Isso, pois os flocos já possuíam velocidade baixa (0,06 m/s) no último trecho do floculador, e ao entrarem na antecâmara, um compartimento de maior área, os flocos assumiam uma velocidade menor ainda.

Tal situação ocasionava uma água floculada de baixa turbidez na entrada dos dutos, em média, cinco vezes menor que a da água bruta. Dessa forma, realizou-se a substituição por uma tubulação perfurada, tipo *manifold* (Figura 52), posicionada mais próxima da entrada de cada duto, cujos valores foram em média duas vezes menores que a água bruta.

Figura 51 – Tê perfurado para distribuição de água floculada.

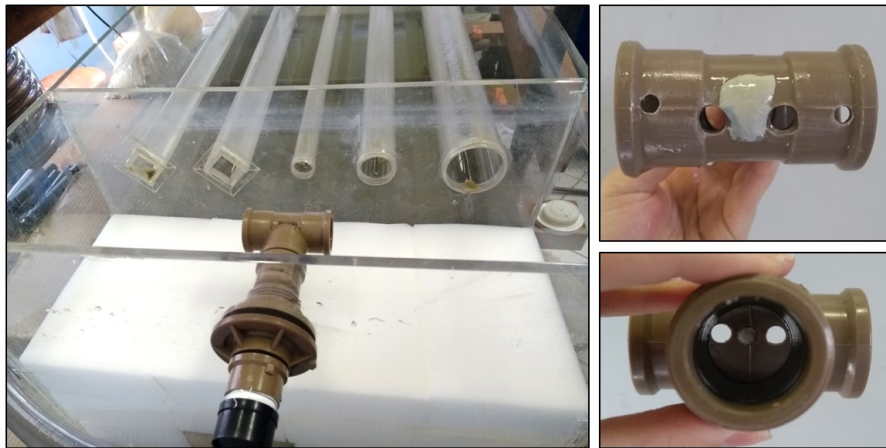


Figura 52 – Tubulação perfurada (*manifold*) para distribuição de água floculada.



Na tubulação *manifold*, foi efetuado um orifício posicionado em frente a cada duto, com alinhamento dos centros das seções. Essa mudança evitou de forma mais efetiva a sedimentação de flocos na antecâmara.

5.2.2 Decantador em Escala Piloto 2

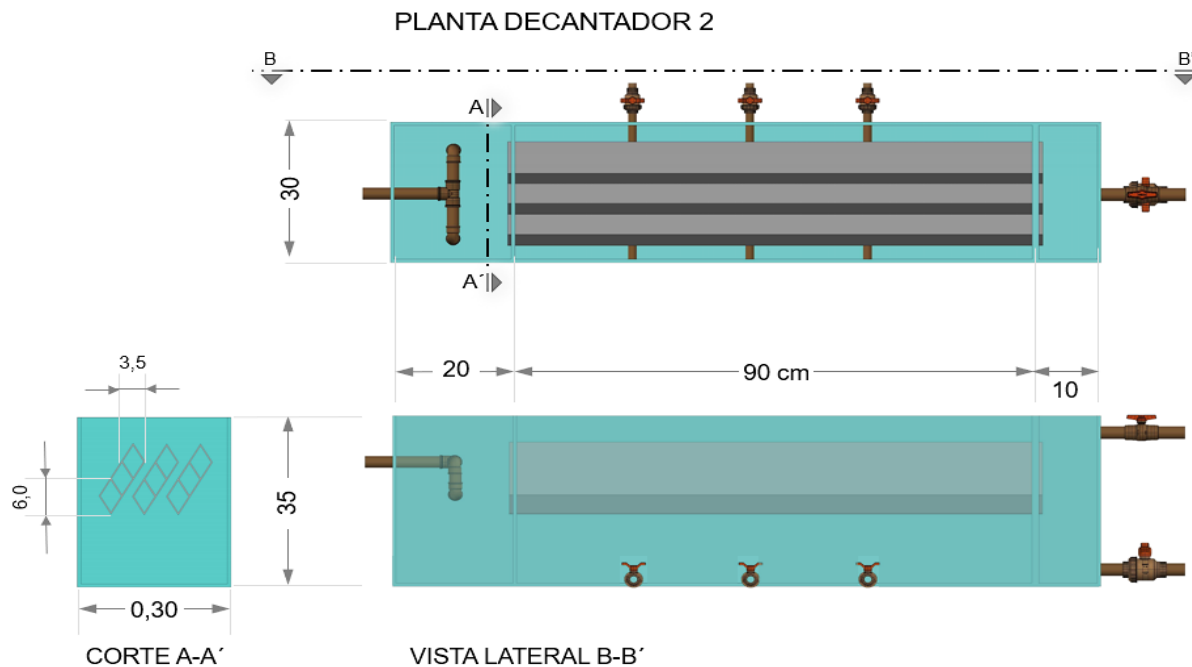
O comprimento relativo nessa unidade piloto resultou em 15,0 (Equação 6), um pouco menor que 20, recomendado por Yao (1970), e a distância horizontal longitudinal em 90 cm (Equação 7). A soma da vazão calculada para os 9 dutos losangulares resultou em 1,9 L/min.

O piloto de decantação 2 também foi dotado de antecâmara, porém com dimensões diferentes, com 20 x 30 x 35 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente.

A câmara comum de saída após o arranjo de dutos exibiu dimensões de 10 x 30 x 35 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente.

A altura ficou um pouco maior que o Decantador 1, pois há três camadas de dutos sobrepostas. Na Figura 53, é demonstrado o desenho em planta e cortes do decantador 2.

Figura 53 – Planta, vista e corte do Decantador 2.

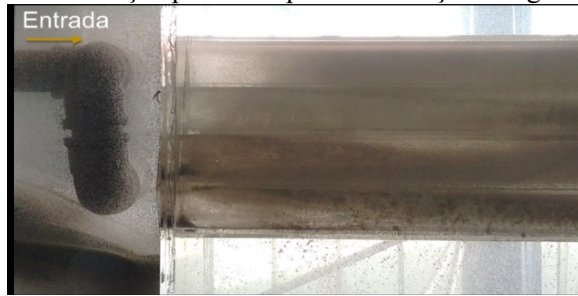


Ao adentrar na antecâmara do Decantador 2, a velocidade dos flocos diminuía pelo aumento da área, por haver pouca turbulência e baixo gradiente de velocidade. Assim, os flocos possuíam uma tendência de sedimentar já na antecâmara. Por isso, foi instalado um

dispositivo de distribuição mais próximo da entrada dos dutos antes de iniciar os experimentos em si.

Por serem 9 dutos no arranjo, esse dispositivo (Figura 54) não foi eficaz para propiciar uma distribuição de água floculada homogênea entre os dutos, direcionando maior parte dos flocos para os dutos inferiores.

Figura 54 – Tubulação perfurada para distribuição de água floculada.



5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS (FASE I – ETAPA 1)

5.3.1 Análise Estatística Descritiva

5.3.1.1 Análise descritiva geral

A análise estatística descritiva permitiu tanto resumir quanto explorar o conjunto dos dados obtidos, para compreender melhor o comportamento dos parâmetros medidos nesta etapa.

Na Tabela 11, está expressa a análise descritiva dos parâmetros principais observados no Decantador 1, mostrando as medidas de tendência central (média, mediana e moda) e medidas de dispersão (valor mínimo, máximo e desvio padrão) dos dados referentes ao sistema como um todo. Nesta tabela ainda não se individualizou os resultados por duto de sedimentação com o intuito de uma análise inicial.

Tabela 11 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase I, Etapa 1.

Parâmetro	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
Vazão total do sistema (L/min)	1,90 ± 0,02	1,89	1,89	1,60	2,46	0,10 ± 0,00	
Velocidade longitudinal no duto (cm/min)	39,7 ± 0,5	38,3	33,3	20,3	89,5	8,0 ± 0,4	
Turbidez (uT)	Água bruta	119 ± 1	122	130	90	136	12 ± 1
	Água floculada	45,2 ± 1,6	43,3	45	4,8	130	24,3 ± 1,2
	Água decantada	1,76 ± 0,06	1,53	Múltipla	0,53	6,08	0,92 ± 0,04
Eficiência em remoção de turbidez (%)	Decantador	93,9 ± 0,4	96,3	96,4	44,4	99,5	6,5 ± 0,3
	Sistema	98,5 ± 0,1	98,7	99	95,2	99,6	0,8 ± 0,0
Cor aparente (uH)	Água bruta	1565 ± 11	1590	1564	950	1752	162 ± 8
	Água floculada	504 ± 16	498	255	55	1287	244 ± 12
	Água decantada	28 ± 1	24	23	8	94	14 ± 1
Eficiência em remoção cor aparente (%)	Decantador	91,8 ± 0,5	94,6	Múltipla	32,4	99,2	8,0 ± 0,4
	Sistema	98,2 ± 0,1	98,4	Múltipla	92,1	99,5	0,9 ± 0,0

Ao analisar a Tabela 11, foi possível observar algumas características dos parâmetros ambientais medidos e condições hidráulicas do processo.

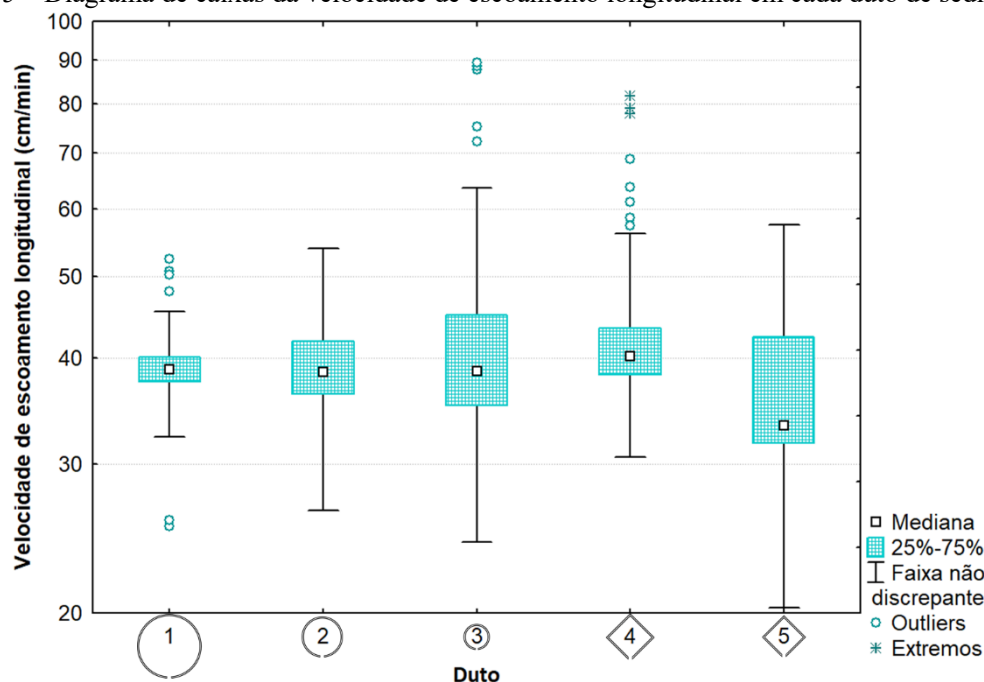
Primeiramente, pôde-se observar que a vazão se manteve praticamente constante durante todo o período de amostragem. Os dados variaram em média 5,3% em relação à média amostral, assim, conseguiu-se manter uma variação pequena desse parâmetro.

Buscou-se manter a turbidez da água bruta constante. Através da análise dos dados, constatou-se uma variação padrão de cerca de 10% em relação à média amostral, atingindo assim, o objetivo proposto. Entretanto, ao se observar a turbidez da água floculada, nota-se que houve um desvio padrão de mais de 50%. Isto se deu principalmente devido à elevação dos valores após mudança no dispositivo de distribuição, que vigorou a partir da 13ª operação.

Mesmo com o ajuste dos registros de saída de água decantada para manter a mesma velocidade longitudinal em todos os dutos durante a operação da Etapa 1, houve certa variação da mesma ao longo das operações. Através da análise dos dados amostrais, se obteve uma velocidade de escoamento longitudinal média nos cinco dutos com um desvio padrão de 20% em relação à média, considerada uma variação pequena, que permite uma comparação confiável acerca da influência da geometria na eficiência do decantador.

A oscilação dos dados da velocidade longitudinal por duto pode ser melhor compreendida no diagrama de caixas contido na Figura 55.

Figura 55 – Diagrama de caixas da velocidade de escoamento longitudinal em cada duto de sedimentação.



A partir da Figura 55, nota-se que, com exceção dos dutos 3 e 5, houve pouca oscilação na velocidade longitudinal, com a maior parte dos dados concentrados entre 35 e 45 cm/min. O valor máximo para esse parâmetro na Tabela 11 é referente apenas ao Duto 3, sendo um ponto isolado, comparado com as máximas dos demais, que não passaram de 60 cm/min. Os valores referentes a essa operação do Duto 3, todavia, não foram excluídos, pois não houve alteração na qualidade da água decantada.

A turbidez média da água decantada foi de 1,76 uT, considerando todos os dutos de sedimentação, um valor de boa qualidade de acordo com a literatura. O Decantador 1 também se mostrou satisfatório na remoção de cor aparente, com uma eficiência média de 91,8%. Os dados oscilaram em relação à média amostral, devido às diferenças entre os resultados dos dutos.

A Portaria de Consolidação nº 5 (2017), do Ministério da Saúde, que consta no Anexo XX os padrões de potabilidade de água para o consumo humano, determina que a água tratada deve conter uma cor aparente de no máximo 15 uH. Tendo em vista que a função do decantador é remover apenas a parcela de sólidos suspensos da cor aparente e, que ainda haverá a unidade de filtração subsequente, a unidade proposta foi eficaz, fornecendo uma cor aparente média de 28 ± 1 uH da água decantada. Os filtros rápidos tendem a conseguir absorver com facilidade essa ordem de valor, apresentando uma água filtrada com valores menores que 15 uH sem prejudicar a carreira de filtração.

Avaliando a eficiência a partir da Tabela 11, observa-se que houve uma eficiência média de remoção de turbidez igual a $93,9\% \pm 0,4\%$, considerando todos os dutos. Isto mostra que, independente do duto, o Decantador 1, em média, apresentou uma eficiência próxima ao recomendado pela literatura (95%).

A porcentagem de remoção de turbidez pelo decantador obteve uma oscilação padrão de aproximadamente 7% em relação à média amostral. Isso se deu pois houve dutos com maior e menor eficiência, como será discutido posteriormente.

Comparando o Decantador 1 com outros decantadores da literatura, os resultados são positivos para a inovação do presente trabalho. Os decantadores lamelares, de placas paralelas inclinadas aplicados nos trabalhos de Sharma e Bhatia (2018), Gurjar e colaboradores (2017), Tarpagkou e Pantokratoras (2014), e Clark e colaboradores (2009), evidenciaram eficiências de remoção de sólidos iguais a 45%, de 70% a 80%, 93%, cerca de 65%, respectivamente, ou seja, menores ou iguais ao obtido com estudo atual.

Bhole et. al (1996) realizaram um experimento com dutos de sedimentação inclinados com diferentes formatos da seção, obtendo eficiência de remoção de sólidos variando de 82% a 97%, isto é, com eficiências inferiores e superiores a deste estudo.

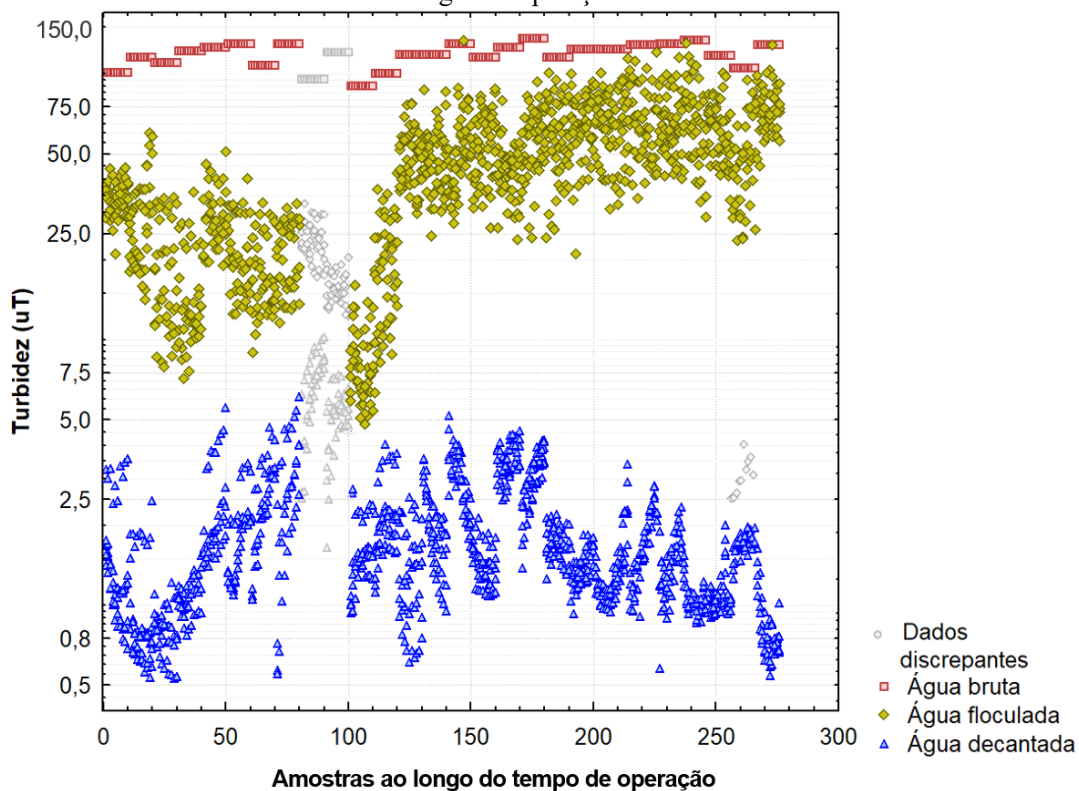
Em relação aos parâmetros complementares (pH e temperatura), nessa etapa, o pH da água bruta, floculada e decantada foi, em média, igual a 6,42, 5,73 e 5,95, respectivamente. As temperaturas médias da água bruta, floculada e decantada foram de 20,9°C, 20,9°C e 20,5°C, respectivamente.

5.3.1.2 *Variabilidade temporal*

A turbidez foi analisada ao longo do tempo e por duto. Para observar a variação temporal, foi construído um diagrama de dispersão (Figura 56), verificando a turbidez da água bruta, floculada e decantada em relação as amostras obtidas ao longo das operações, de modo geral inicialmente.

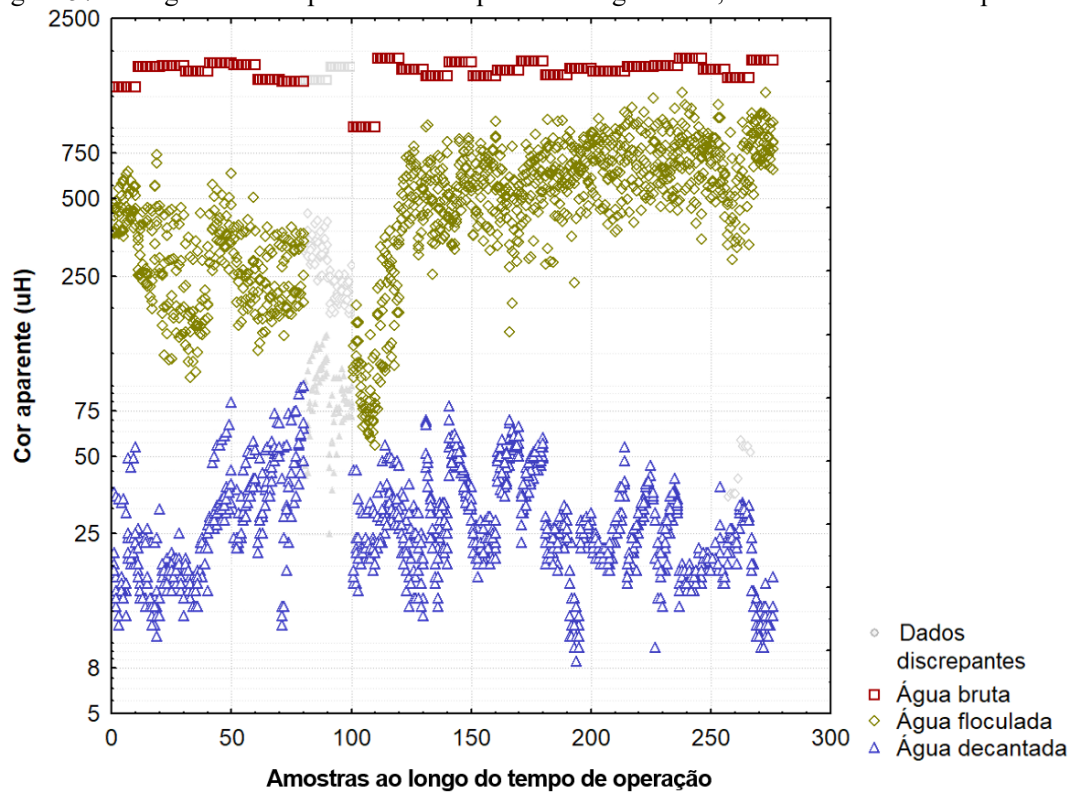
Foram realizadas 27 operações. Em cada uma, foram coletadas 10 amostras. Basicamente, o eixo das abcissas “amostra” representa a operação relacionada (ex.: 0 a 10 representa a operação 1 e assim por diante).

Figura 56 – Diagrama de dispersão da turbidez da água bruta, floculada e decantada por amostra coletada ao longo das operações.



Analogamente ao diagrama de dispersão da turbidez, a Figura 57 mostra a dispersão dos dados de cor aparente da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo.

Figura 57 – Diagrama de dispersão da cor aparente da água bruta, floculada e decantada por



Das 27 operações, 25 foram consideradas com dados úteis e consistentes para a análise estatística, visto que duas (9ª e 10ª) apresentaram valores extremos (atípicos), em uma análise preliminar. Em ambas as operações excluídas, os processos de coagulação e floculação não foram eficientes, provavelmente devido à piora na qualidade do coagulante PAC. Nos dois dias de operação, a água floculada possuía turbidez com padrão condizente às operações anteriores, porém com flocos pequenos (leves), que chegavam à zona de saída.

Algumas considerações devem ser feitas quanto às operações:

- a) nas operações 9 a 10, os valores de turbidez da água decantada foram mais elevados do que as outras operações, mesmo com uma faixa similar de turbidez da água floculada das operações anteriores. Além disso, nas análises preliminares do histograma e diagrama de caixas, os valores discrepantes em sua maioria eram provenientes desses dois dias de operação. Por isso, foram excluídos da análise final de dados;
- b) a turbidez média da água floculada nas operações 11 e 12 foi igual a 14 uT, bem inferior em relação às demais, entretanto, a turbidez da água decantada foi, em sua maioria, menor do que 2 uT. A ocorrência de valores baixos de turbidez na entrada do decantador resulta em menores eficiências da unidade, dando a falsa aparência de que o decantador não foi eficaz, ou seja, de que não cumpriu o seu papel de remover sólidos suficientemente para a próxima unidade. Em virtude de os valores de água decantada permanecerem baixos, essas operações foram mantidas para análise;
- c) nas operações 15, 17 e 18, a turbidez da água decantada de praticamente todos os dutos se manteve mais elevada, em torno de 3,5 e 4,5, porém a eficiência de remoção foi acima de 90%, por isso, tais dados foram utilizados na análise;
- d) nas operações 5, 7 e 8 também houve dados de água decantada com turbidez mais elevada, porém foram referentes apenas ao Duto 1, não representando uma discrepância do dia de operação;
- e) já os dados excluídos na operação 26 referentes ao Duto 1, foi devido a uma mudança momentânea no dispositivo de distribuição de água floculada, que ocasionou uma turbidez da água floculada com valores tão baixos quanto os da água decantada.

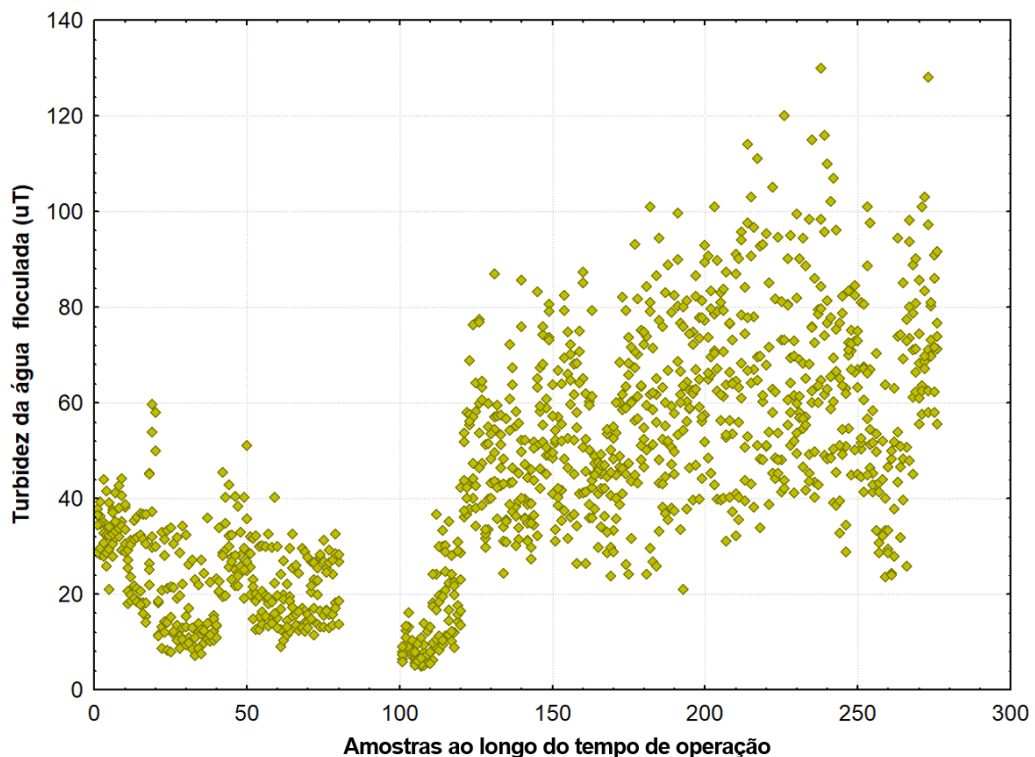
Analisando o diagrama de dispersão da Figura 56, é possível observar como a turbidez da água bruta se manteve praticamente constante, variando entre 100 e 150 uT. Já a turbidez da água floculada apresentou elevada variabilidade ao longo do tempo. Somente após a troca do tê de distribuição por um *manifold* na antecâmara, na 13ª operação, que ocorreu o aumento da turbidez da água floculada.

A turbidez da água decantada variou basicamente entre 0,5 e 5,0 uT ao longo do tempo, dependendo do dia de operação. Chegou-se à conclusão que essa variação diária teve a influência de variáveis externas que não puderam ser controladas, como a temperatura e a qualidade do coagulante PAC (que variava com o tempo), e afetaram os processos de coagulação e floculação.

Nota-se, na Figura 57, que o comportamento da cor aparente foi bem similar ao da turbidez, considerando suas respectivas unidades. As operações com dados discrepantes se deram pelos mesmos motivos supracitados para o caso da turbidez. A cor aparente da água bruta permaneceu entre 1000 e 2000 uH, enquanto que da água floculada variou entre 50 e 1400 uH. A água decantada assumiu valores entre 8 e 80 uH.

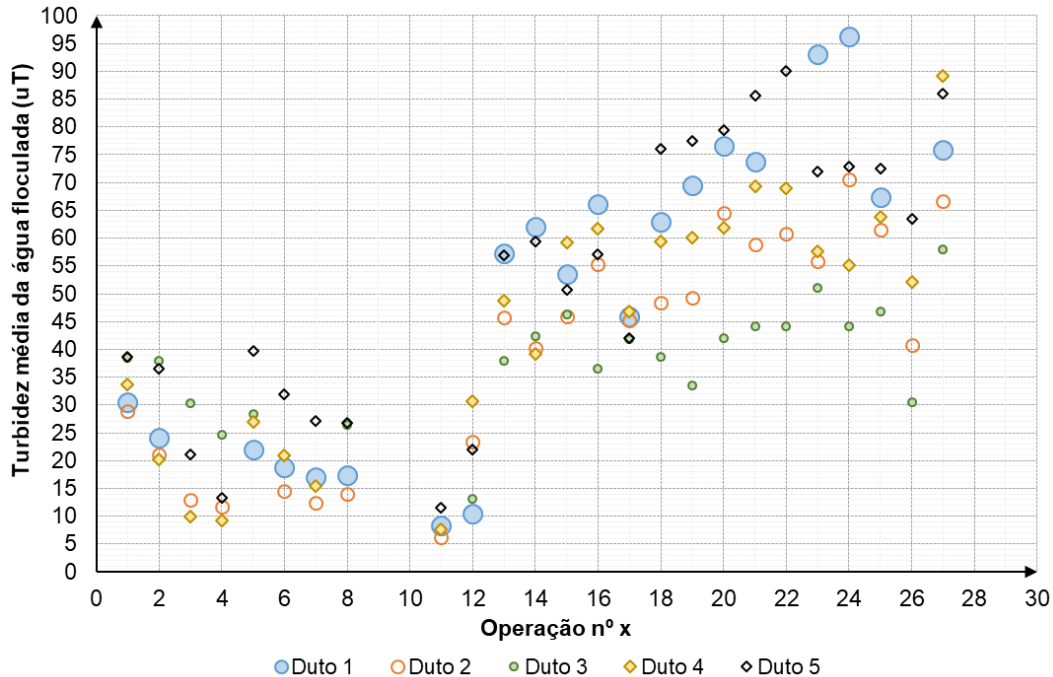
Nas Figuras 59 e 60, estão dispostos os dados de água floculada por cada amostra coletada e os dados da média diária das amostras por dutos, respectivamente, ao longo dos dias de operação. Nesses gráficos, o eixo das ordenadas está em escala normal, devido à distribuição normal dos dados de água floculada, como será discutido posteriormente.

Figura 58 – Diagrama de dispersão das amostras de turbidez da água floculada ao longo das operações.



Pode-se observar na Figura 58 que houve uma mudança no comportamento da água floculada a partir da 13ª operação, quando foi instalado na antecâmara o distribuidor tipo *manifold* no lugar do tê.

Figura 59 – Gráfico da turbidez média diária da água floculada operação, para cada duto.

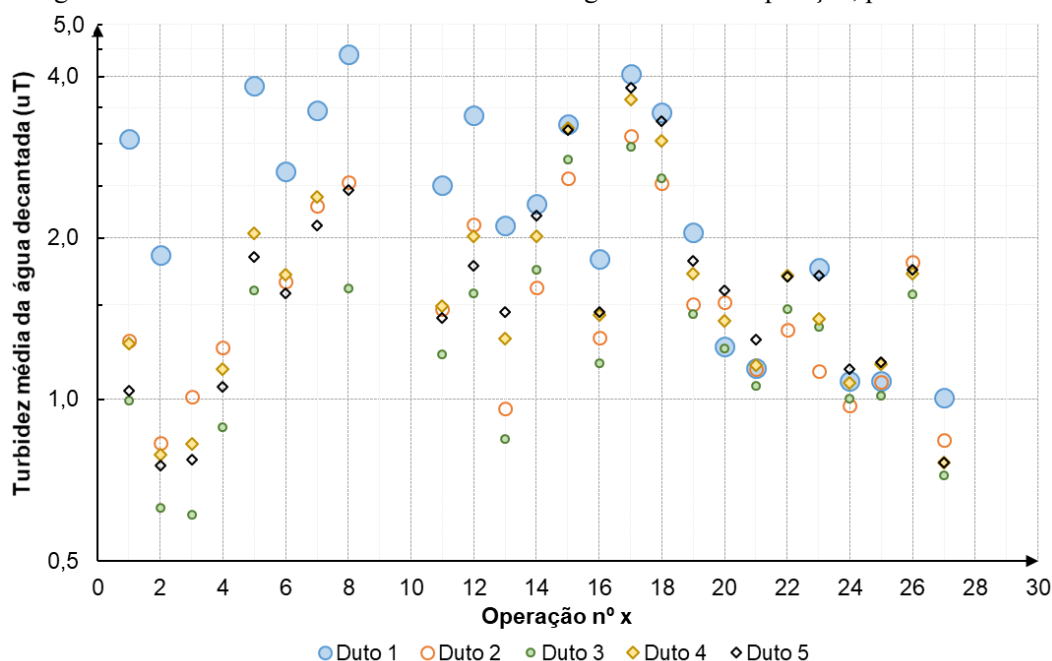


Em ambos os diagramas, inicialmente (até a 12ª operação), os dados de água floculada eram muito mais homogêneos, porém, assumiam valores menores, com a maior parte entre 5 e 45 uT. Após a mudança, a partir da 13ª operação, houve uma maior dispersão dos valores de água floculada entre os dutos, com os dados se concentrando principalmente entre 30 e 100 uT.

Pode-se inferir a partir da Figura 59, que o dispositivo *manifold* na maior parte do tempo favoreceu os dutos 1 e 5 na distribuição de água floculada, justamente os localizados nas extremidades. Geralmente, o Duto 4 recebeu afluente com turbidez um pouco maior ou semelhante ao Duto 2. Por fim, o Duto 3 foi o que usualmente recebeu menor turbidez. Essa dispersão maior da qualidade afluente entre os dutos dificulta uma posterior comparação da influência da geometria da seção na eficiência de decantação.

As médias diárias da turbidez da água decantada por duto é demonstrada na Figura 60.

Figura 60 – Gráfico da turbidez média diária da água decantada operação, para cada duto.



Pela Figura 60, até a 13ª operação, quando as amostras de água floculada estavam com valores de turbidez menos dispersos, pode-se observar uma diferença mais nítida deste parâmetro na água decantada entre dos dutos. Considerando o tamanho, quanto menor o duto, menor a turbidez da água decantada. Tendo em vista apenas os losangulares, essa tendência se confirma, pois, mesmo recebendo uma água floculada mais turva, o Duto 5, de menor seção transversal, obteve uma turbidez de água decantada inferior ao Duto 4, de maior seção transversal.

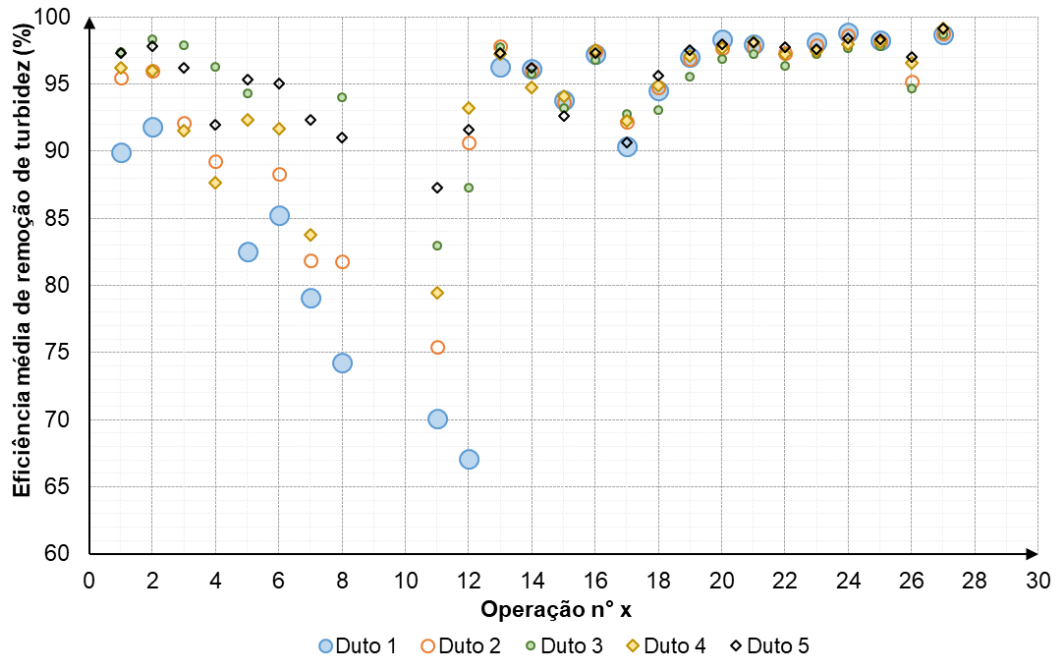
Para a avaliação do formato, faz-se necessário uma comparação entre os dutos 2 e 5. Observa-se que apesar de a turbidez da água floculada do Duto 5 ter sido superior ao do 2, a turbidez da água decantada foi semelhante em ambos, denotando possivelmente uma maior eficiência para o formato losangular.

Considerando as operações posteriores ao 13º dia, não foi possível observar tendências aparentes, devido à grande dispersão da água floculada. Para isso, é necessária uma avaliação da eficiência média de remoção de turbidez ao longo do tempo, como mostra Figura 61.

Por meio da Figura 61, nota-se visualmente uma diferença extremamente significativa entre os resultados até o 13º dia de operação, quando a água floculada estava mais homogênea, em relação aos demais dias de operação. No primeiro momento, as eficiências mais elevadas corresponderam aos dutos de menor seção transversal. Além disso,

para dutos com equivalente altura e diferente formato (2 e 5), o duto losangular apresentou uma maior eficiência.

Figura 61 – Gráfico da eficiência média de remoção de turbidez operação, para cada duto.



A partir do 13º dia, a eficiência média do decantador aumentou, independente da geometria dos dutos. Isso justifica o uso do *manifold*, pois, mesmo que tenha ocasionado uma dispersão maior da água floculada, seu uso foi importante para elevar esses valores, pois o decantador é mais eficiente para afluentes com turbidez elevada.

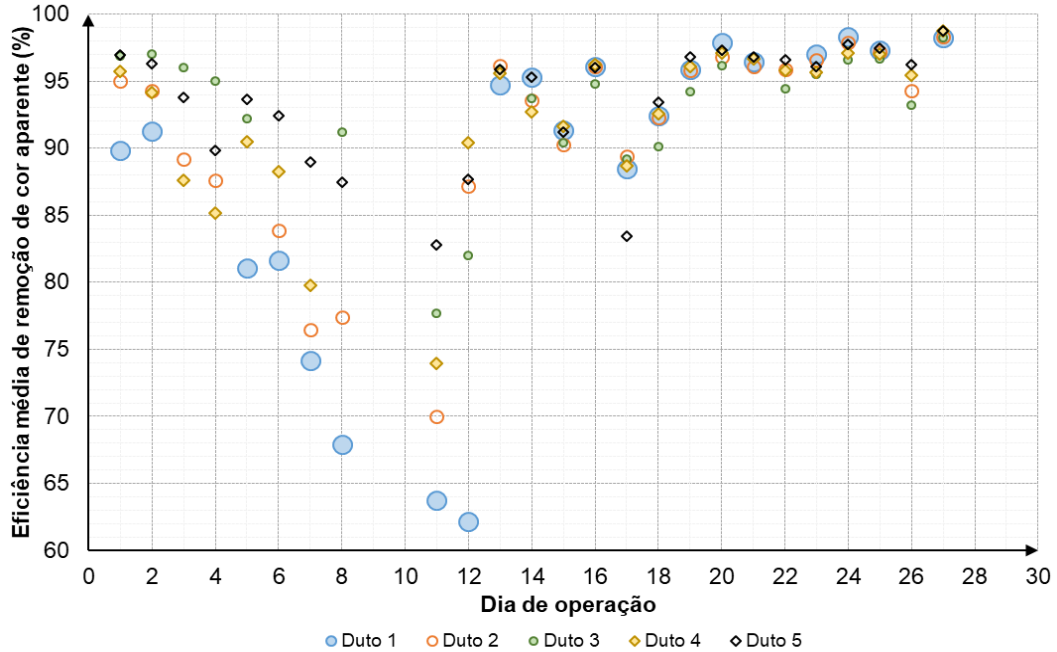
Segundo Richter (2009), o tratamento do tipo convencional é adequado para águas turvas, com turbidez de média à elevada, entretanto, quando a turbidez da água bruta é menor que 50 uT, geralmente ocorre a falta de núcleo pesado para os flocos sedimentarem, diminuindo a eficiência da decantação. Ademais, teoricamente, a turbidez da água floculada não deve diminuir em relação à bruta, pois o floculador não é unidade com função removedora de flocos.

No caso deste trabalho, embora a média de turbidez da água bruta foi de 120 uT, houve predominância de valores de turbidez da água floculada menor do que 50 uT até a 12ª operação, mas mesmo assim a turbidez da água decantada não foi afetada, e a eficiência de remoção de turbidez se manteve elevada em sua maioria (principalmente até a operação 7).

O gráfico de dispersão da eficiência tem relação direta com o diagrama de dispersão da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo (Figura 56). Sendo assim, são feitas as mesmas considerações acerca dos dias de operação, como o motivo da exclusão das operações 9 e 10 e o motivo da eficiência menor nas operações 11 e 12.

O comportamento da eficiência média de remoção de cor aparente nos dutos foi semelhante ao da turbidez, conforme observado na Figura 62.

Figura 62 – Gráfico da eficiência média de remoção de cor aparente por dia de operação, para cada duto.



5.3.1.3 Análise da distribuição dos dados

Os dados de turbidez referentes à água floculada apresentaram uma distribuição mais próxima à distribuição Normal, como é possível observar no gráfico *Probability-Probability* (Figura 63) e no histograma de frequência (Figura 64).

Figura 63 – Distribuição dos dados de água floculada em relação à curva de distribuição teórica Normal.

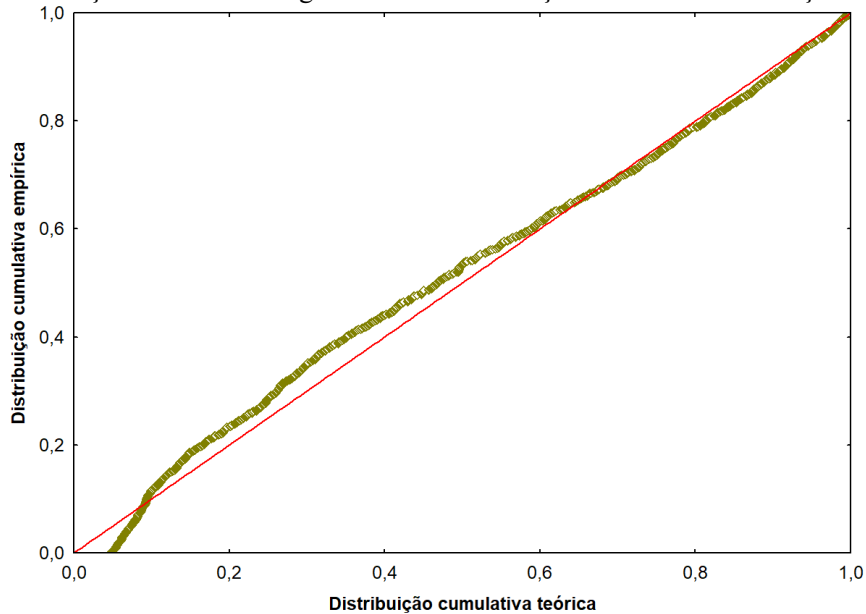
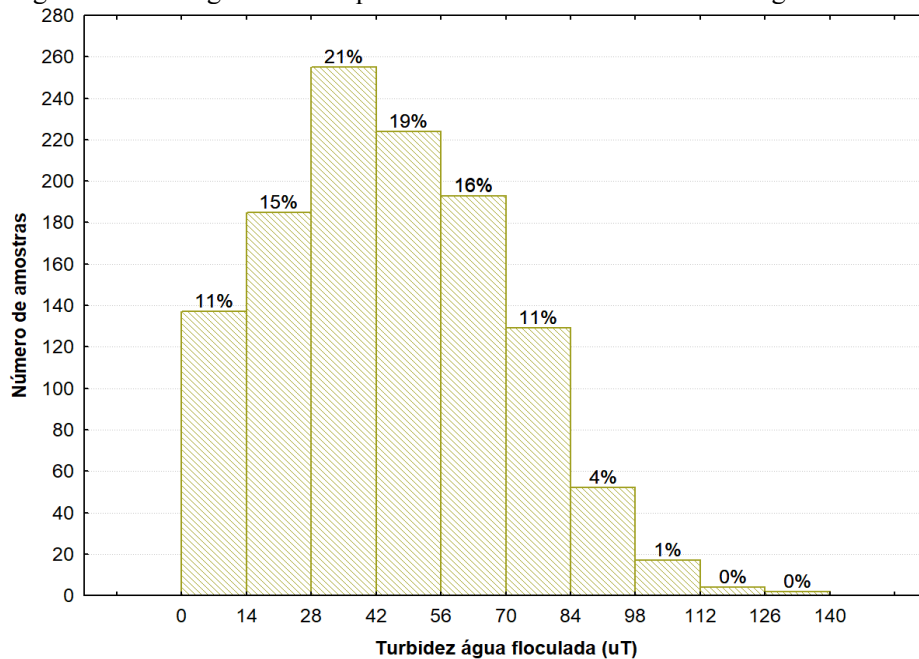


Figura 64 – Histograma de frequência das amostras de turbidez de água floculada.

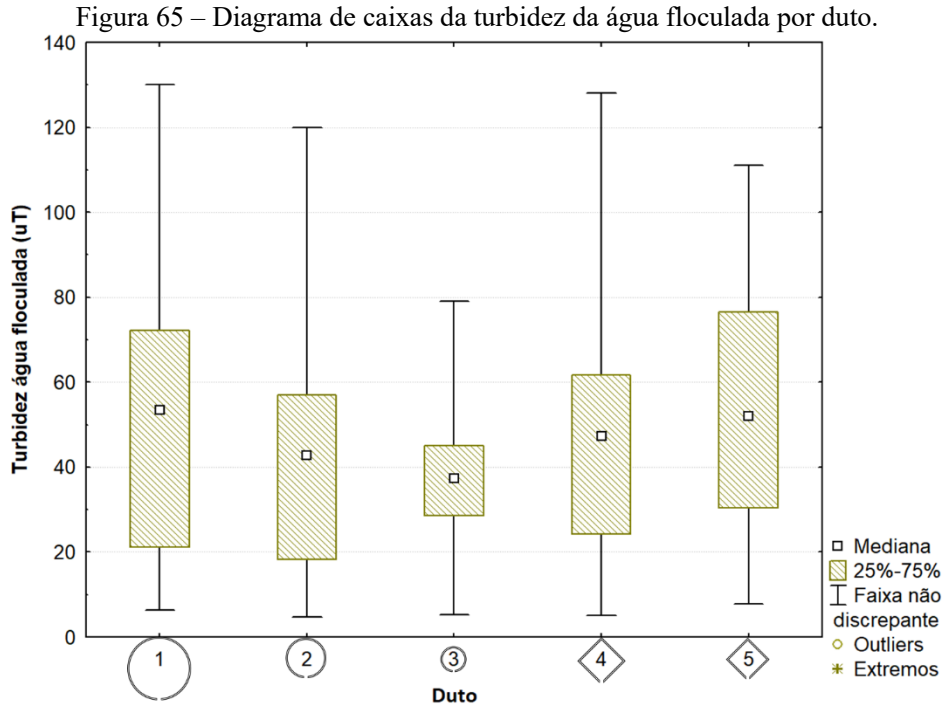


Observando o histograma da Figura 64, notou-se que os 1198 dados de turbidez da água floculada aparentemente possuem distribuição Normal, com certa simetria entre 0 e 84 uT.

Os valores variaram mais do que o desejável. O interessante seria obter resultados próximos da turbidez da água bruta. Porém, devido à baixa velocidade no interior do terceiro compartimento do floculador tubular helicoidal, a unidade de floculação acabou removendo uma parcela dos sólidos, que deveriam ser removidos apenas no decantador. Além disso, alguns ajustes ao longo do tempo no dispositivo de distribuição de água floculada na antecâmara do decantador contribuíram ainda mais para essa variação da turbidez.

Somente 7% dos dados apresentaram turbidez da água floculada superior a 84 uT. O restante apresentou uma turbidez menor: em torno de 26% dos dados foram inferiores a 28 uT; 40% se situou entre 28 e 56 uT; e 27% entre 56 e 84 uT.

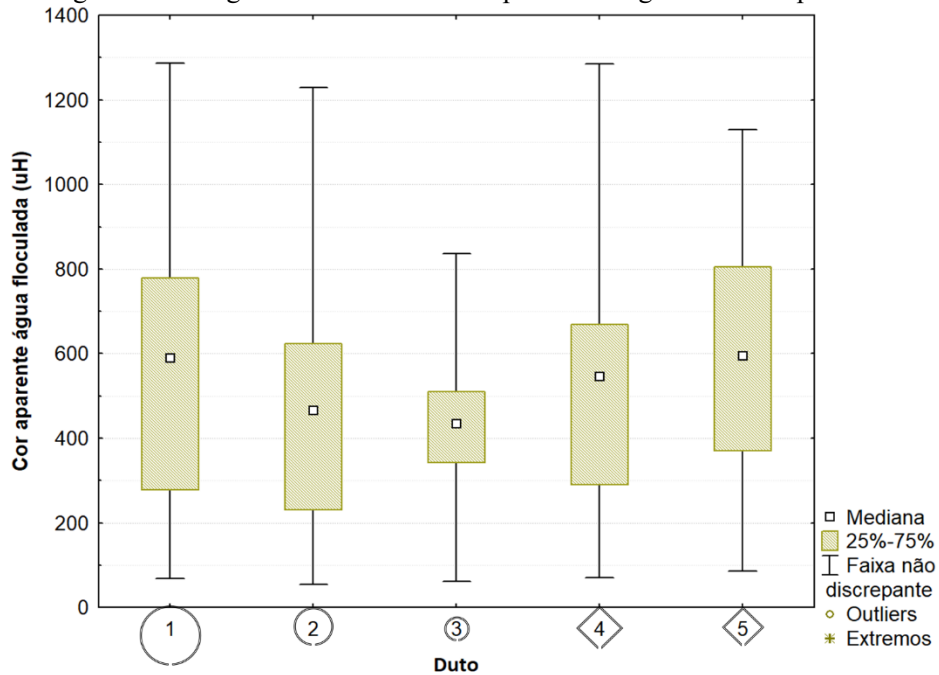
Para compreender melhor a distribuição de água floculada na entrada de cada duto, elaborou-se o diagrama de caixas da turbidez da água floculada por duto, mostrado na Figura 65.



Por meio do diagrama (Figura 65), notou-se haver uma proximidade dos valores medianos de turbidez da água floculada entre os dutos, com medianas entre 40 e 60 uT, e apresentando valores um pouco maiores nos dutos das extremidades. Analisando 50% dos dados de turbidez em cada duto, percebe-se que ocorreu uma variabilidade maior no duto 1, seguida do duto 5, e bem similar nos dutos 2 e 4. O duto 3 foi o que apresentou menor variabilidade. Observando a faixa não discrepante, pode-se dizer que a variabilidade foi expressiva, porém observando o intervalo em que 50% dos dados se mantiveram em cada duto, pode-se dizer que variaram menos, basicamente entre 20 e 75 uT.

Da mesma maneira, os valores de cor aparente da água floculada variaram bastante devido às dificuldades relacionadas à distribuição na entrada dos dutos (dispositivo na antecâmara). Essa variação também é percebida no diagrama de caixas da Figura 66, o qual permite, por sua vez, analisar a cor aparente da água afluyente a cada duto de sedimentação.

Figura 66 – Diagrama de caixas da cor aparente da água floculada por duto.



Por outro lado, os dados relacionados à água decantada apresentaram uma distribuição mais próxima à distribuição Lognormal, como pode-se observar no gráfico *Probability-Probability*, (Figura 67), e no histograma de frequência (Figura 68).

Figura 67 – Distribuição dos dados de água decantada em relação à distribuição teórica Lognormal.

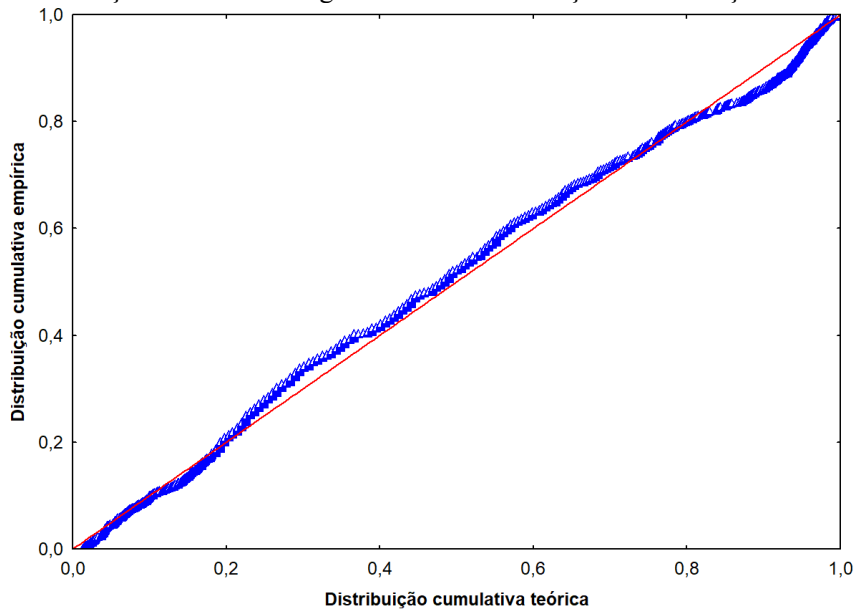
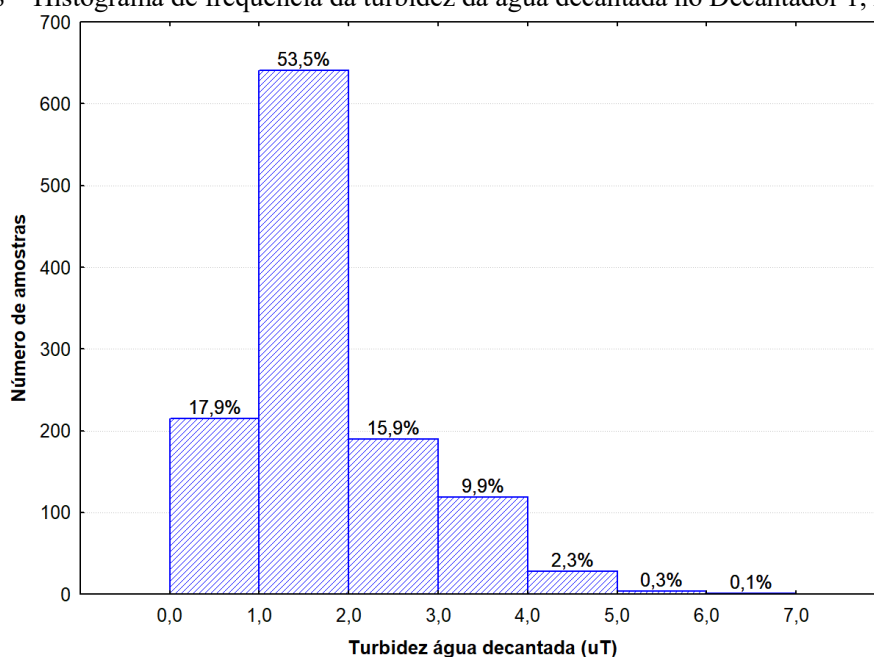


Figura 68 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada no Decantador 1, na Etapa 1.



Devido à aderência da curva empírica à curva teórica de distribuição Lognormal, a melhor demonstração desses dados nos demais gráficos foi com uso do eixo em escala logarítmica. Em relação ao histograma da Figura 68, observou-se que mais da metade dos dados de turbidez da água decantada assumiram valores entre 1,0 e 2,0 uT.

A turbidez de água decantada geral (independente dos dutos) ficou 99,5% do tempo com turbidez inferior a 5,0 uT, 97,2% do tempo com turbidez inferior a 4,0 uT e 71,4% do tempo com turbidez inferior a 2,0 uT. Considerando a turbidez da água decantada, mesmo com diferentes formas e tamanhos de dutos, o decantador em geral apresentou valores satisfatórios, similares a decantadores de alta taxa de muitas ETAs convencionais.

A análise de frequência dos resultados de turbidez inferiores a 4,0 uT e a 2,0 uT foram repetidos (na Tabela 12) separadamente para cada duto de sedimentação do Decantador 1, para comparação entre os mesmos.

Tabela 12 – Quantidade total de amostras de turbidez da água decantada por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram inferiores à turbidez de 4,0 uT e 2,0 uT.

Duto	Símbolo	Nº total de amostras (n)	Turbidez da água decantada < 4,0 uT		Turbidez da água decantada < 2,0 uT	
			Nº de amostras	% tempo	Nº de amostras	% tempo
1	○	214	191	89,3%	86	40,2%
2	◦	246	245	99,6%	189	76,8%
3	◦	236	236	100,0%	199	84,3%
4	◇	246	245	99,6%	188	76,4%
5	◇	256	249	97,3%	196	76,6%

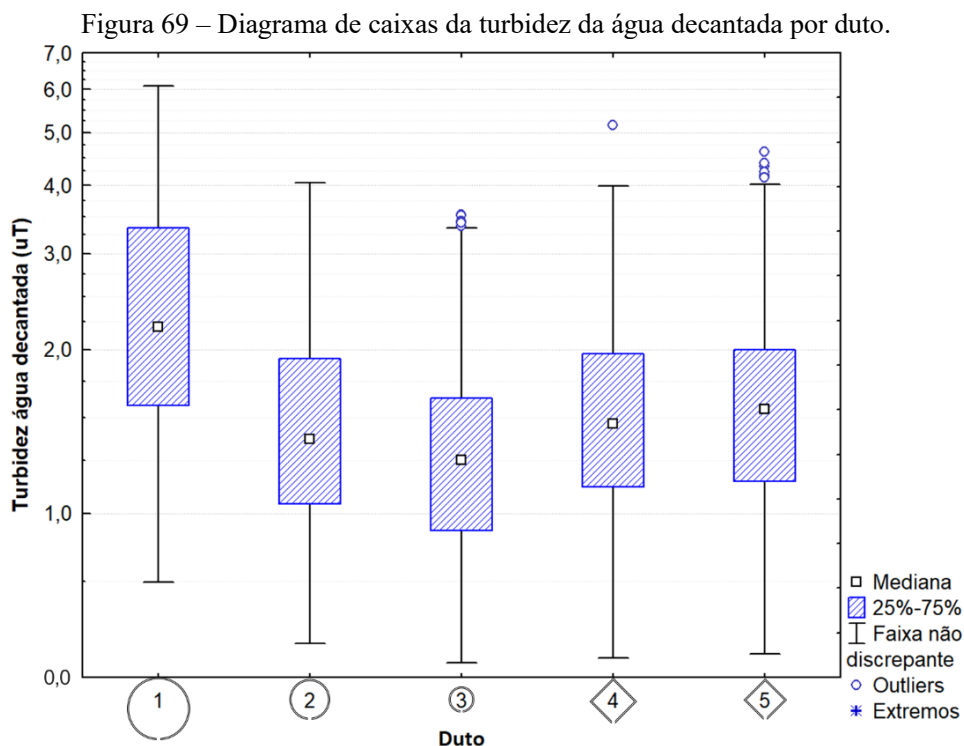
O duto 3 foi o único que apresentou turbidez da água decantada 100% do tempo menor do que 4,0 uT, bem como o que apresentou turbidez menor do que 2,0 uT com maior frequência. Isso é um indicativo que este duto foi o que apresentou uma água decantada de melhor qualidade por mais tempo que os demais, no quesito turbidez.

Comparando os dutos de mesmo formato, à medida que diminui o diâmetro dos dutos circulares, percebe-se uma predominância de valores menores de turbidez da água decantada por mais tempo. Um fato a se destacar é a diferença da frequência de valores do Duto 1, principalmente quando relacionado à turbidez menor do que 2,0 uT, cuja frequência foi de apenas 40,2%.

Ao comparar os dutos losangulares (dutos 4 e 5), tem-se uma porcentagem de tempo para turbidez da água decantada menor do 2,0 uT praticamente igual entre ambos, enquanto que menor do que 4,0 uT há uma frequência um pouco inferior para o duto de menor tamanho. Entretanto, essa análise de frequência não significa que duto 4 foi mais eficiente que o 5, apenas que apresentou 2,3% a mais de tempo com turbidez menor do que 4,0 uT.

No caso dos dutos de mesma altura vertical da seção e diferentes formatos (dutos 2 e 5), a frequência foi bem similar para turbidez da água decantada menor do que 2,0 uT e um pouco menor no duto 5 para turbidez menor do que 4,0 uT.

O diagrama de caixas da turbidez da água decantada por duto, demonstrado na Figura 69, permitiu observar a presença ou ausência de dados discrepantes, a tendência central dos dados, auxiliando na comparação entre os dutos.



Nesse diagrama de caixas (Figura 69), observa-se que, com a exibição em eixo logarítmico, houve similaridade na variabilidade da turbidez da água decantada por duto, bem como, em geral, houve uma distribuição simétrica dos dados para cada duto, comprovando a distribuição lognormal.

Nos dutos 2 a 5, a distribuição de 75% dos dados de turbidez de água decantada concentrou-se aproximadamente entre 0,2 e 2,0 uT. Nestes dutos, todos os valores registrados da água decantada foram inferiores a 5,0 uT, com exceção de um *outlier* no Duto 4, cuja ocorrência seria improvável. Existiram *outliers* nos dos dutos 3, 4 e 5, considerados dados de variação aleatória, inerente ao experimento.

De modo complementar a Tabela 12, ficou mais nítida a diferença do Duto 1 em relação aos demais. Esse duto é o que apresenta maior distância vertical (maior tamanho) para o floco que entra na posição mais desfavorável da seção transversal percorrer e ser removido, provavelmente por isso apresenta resultados menos eficientes. Para o Duto 1, 50% dos dados ficaram entre 1,6 e 3,3 uT.

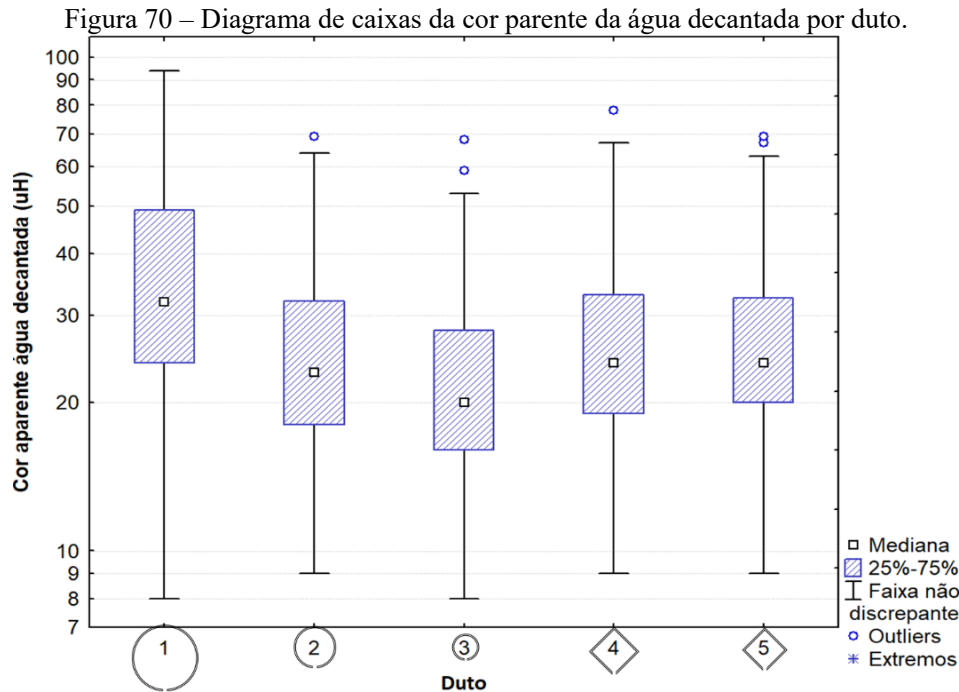
Comparando os dutos circulares, 1, 2 e 3, nota-se redução na turbidez decantada quanto menor for o diâmetro do duto. O Duto 3 apresentou os melhores valores de turbidez dentre todos os dutos, com metade dos valores variando entre 0,8 a 1,6 uT. Isso demonstrou que a seção transversal com menor altura foi a que apresentou resultados melhores.

A distribuição e tendência dos dutos losangulares 4 e 5 foi semelhante entre si, havendo praticamente sobreposição dos intervalos interquartis (entre 1,2 e 2,0 uT), ou seja, não se notou diferença aparente entre os tamanhos dos dutos losangulares.

Do mesmo modo, a diferença entre a distribuição de turbidez da água decantada nos dutos de diferentes formatos (dutos 2 e 5) foi sutil, não se observando diferença significativa por este diagrama.

Como mais de 75% dos dados de água decantada apresentaram uma turbidez abaixo de 2,5 uT, conclui-se que, independente da geometria do duto, a conformação interna do decantador proposto propicia um tratamento eficaz na maior parte do tempo.

Na Figura 70 é apresentado o diagrama de caixas realizado para cor aparente da água decanta por duto.

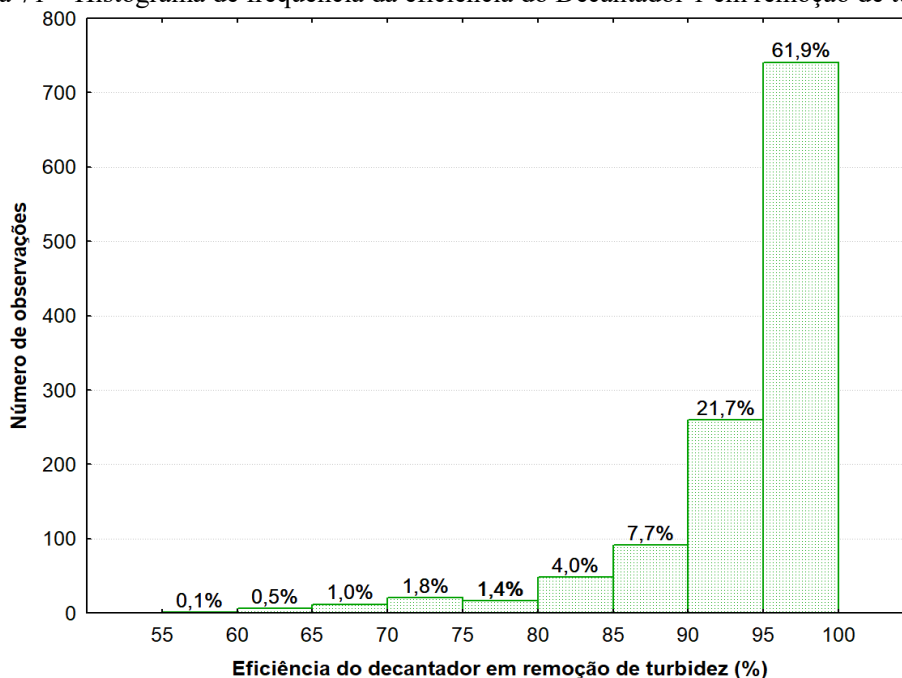


No diagrama de caixas da Figura 70, nota-se uma semelhança no comportamento da cor aparente por duto e a turbidez por duto, em relação à diminuição dos valores com a diminuição do diâmetro dos dutos circulares, à semelhança entre a distribuição dos dutos losangulares e à diferença pequena entre a distribuição dos dutos de diferentes formatos 2 e 5.

A semelhança entre as tendências de distribuição dos dados de turbidez e de cor aparente se deve ao fato de o segundo parâmetro depender, além do teor substâncias dissolvidas, do teor de sólidos em suspensão, característico da turbidez.

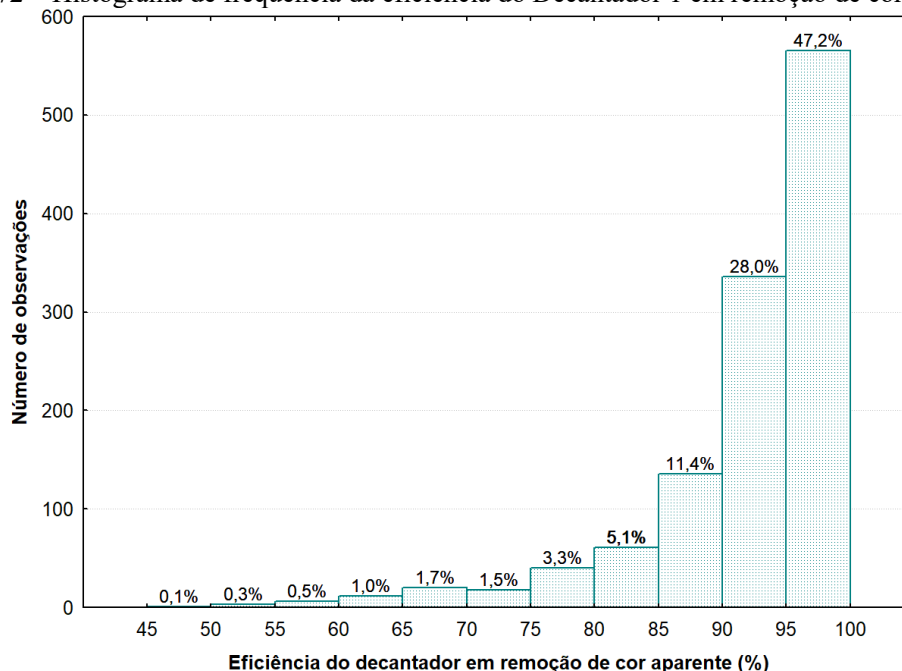
Ainda foram elaborados o histograma de frequência e o diagrama de caixas relacionados à eficiência do decantador em remoção de turbidez. O histograma de frequência, exibido na Figura 71, apresenta a eficiência independente dos dutos, fornecendo uma visão geral da eficiência do Decantador 1. Também foi elaborado, de modo análogo, o histograma de frequência referente à eficiência do decantador em remoção de cor aparente, o qual é demonstrado na Figura 72.

Figura 71 – Histograma de frequência da eficiência do Decantador 1 em remoção de turbidez.



Analisando o histograma da Figura 71, pode-se afirmar que 83,6% dos dados apresentaram eficiência de remoção de turbidez superior a 90%, sendo que, desses dados, 61,9% possuíam eficiência superior a 95%.

Figura 72 – Histograma de frequência da eficiência do Decantador 1 em remoção de cor aparente.



Observa-se que a maior parte dos dados de eficiência de remoção de cor aparente concentram-se entre 90 e 100% e quase a metade entre 95 e 100%. Isso mostra que, aparentemente, o decantador foi eficiente, independente do duto. Apenas 8,4% dos dados

foram menores que 80%, indicando que dificilmente a unidade de tratamento apresenta resultados insatisfatórios. De forma similar à distribuição apresentada pela turbidez, houve uma distribuição semelhante a lognormal espelhada.

Na Tabela 13, foi realizada a análise da frequência em que os dados de eficiência do decantador foram superiores a 85%, 90% e 95% em remoção de turbidez, de modo individual para cada duto de sedimentação do Decantador 1, a fim de verificar a influência da geometria.

Tabela 13 – Quantidade total de amostras de eficiência de remoção de turbidez por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram superiores às eficiências de 85%, 90% e 95%.

Duto	Nº total de amostras (n)	Eficiência > 85%		Eficiência > 90%		Eficiência > 95%	
		Nº de amostras	% tempo	Nº de amostras	% tempo	Nº de amostras	% tempo
1	214	180	84,1%	147	68,7%	107	50,0%
2	246	233	94,7%	195	79,3%	143	58,1%
3	236	233	98,7%	216	91,5%	161	68,2%
4	246	239	97,2%	212	86,2%	152	61,8%
5	256	256	100,0%	231	90,2%	178	69,5%

Analisando a Tabela 13, percebeu-se que a frequência de dados com eficiência de remoção de turbidez acima de 85% se elevou conforme o diâmetro dos dutos circulares diminuía, ou seja, com a diminuição da distância vertical da seção transversal do duto. O mesmo ocorreu para os dutos losangulares, em que o Duto 5, de menor altura da seção transversal, não só apresentou uma frequência maior que o Duto 4, de maior altura, como também foi o único dentre todos que obteve eficiência 100% do tempo superior à 85% de remoção de turbidez. Isso indica que os dutos menores exibem eficiências de remoção superiores com maior frequência, ou seja, provavelmente, são mais eficientes. Esse comportamento se repete para as frequências em que a eficiência é maior do que 90% e 95%.

Comparando os dutos de diferente formato, porém mesma altura da seção (dutos 2 e 5), é possível observar que o duto losangular apresentou maior porcentagem de tempo com as referidas eficiências do que o duto circular. Sendo assim, foi superior em todas as situações, indicando uma influência mais positiva do formato losangular, do que o circular, no aumento da eficiência do decantador em remoção de turbidez.

Ainda é possível observar que os dutos 3 e 5 foram os que apresentam maior porcentagem de tempo com valores elevados de eficiência, mesmo o duto circular possuindo altura vertical menor que o duto losangular. O duto losangular prevaleceu nas frequências de tempo com eficiência superior a 85% e 95%, ficando um pouco inferior na porcentagem de

tempo com eficiência maior que 90%. De qualquer maneira, houve indicação de que o formato losangular promove eficiências superiores na decantação.

A frequência da eficiência de remoção de cor aparente para cada duto foi muito similar para o caso da turbidez, chegando-se as mesmas conclusões supracitadas. Por isso, limitou-se a apenas mostrar os resultados na Tabela 14.

Tabela 14 – Quantidade total de amostras de eficiência de remoção de cor aparente por duto e a porcentagem do tempo que as mesmas foram superiores às eficiências de 85%, 90% e 95%.

Duto	N° total de amostras (n)	Eficiência > 85%		Eficiência > 90%		Eficiência > 95%	
		N° de amostras	% tempo	N° de amostras	% tempo	N° de amostras	% tempo
1	214	180	78,5%	147	65,4%	107	43,9%
2	246	223	90,7%	169	68,7%	106	43,1%
3	236	223	94,5%	198	83,9%	118	50,0%
4	246	233	94,7%	187	76,0%	110	44,7%
5	256	251	98,0%	207	80,9%	137	53,5%

Com relação à distribuição do histograma da Figura 71, pode-se dizer que se assemelha a uma lognormal espelhada. Isso se dá pois, como a maior parte dos dados referentes à eficiência estão próximos de 100%, somente a porcentagem remanescente da eficiência que demonstra uma tendência logarítmica. Por isso, foi feita uma pré-transformação dos dados, para melhor visualizar a diferença entre os dutos, observando a porcentagem de turbidez remanescente na água decantada (100% - eficiência (%)), em escala logarítmica, conforme mostra a Figura 73. Ainda foi utilizado para análise um gráfico de dispersão da eficiência (sem transformação) na Figura 74, pois são dados mais facilmente reconhecidos na literatura.

Figura 73 – Diagrama de caixas da porcentagem de turbidez remanescente na água decantada por duto.

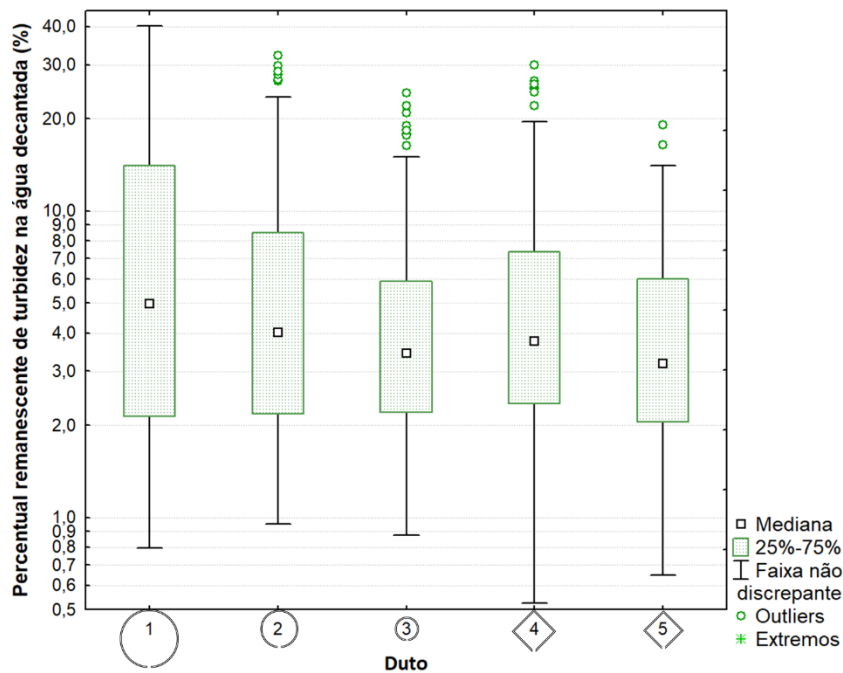
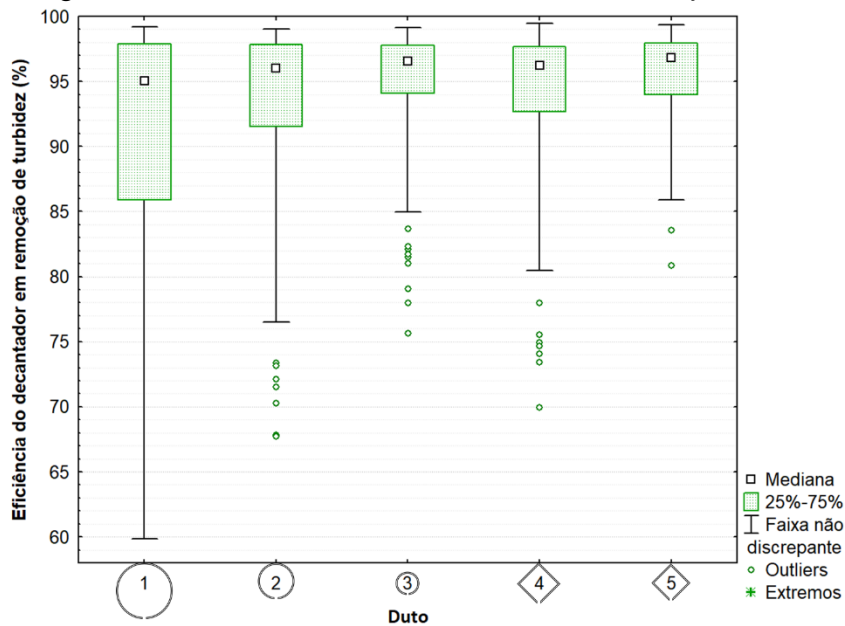


Figura 74 – Diagrama de caixas da eficiência do Decantador 1 em remoção de turbidez por duto.



No diagrama de caixas do percentual remanescente de turbidez na água decantada (Figura 73), observa-se que os 50% dos dados abaixo da mediana foram inferiores a 5%, independente do duto. O Duto 1 apresentou os piores resultados, com a metade superior de dados com percentual entre 5% e 40% de turbidez remanescente. Com relação à distribuição, observou-se que, após a transformação, os dados exibiram comportamento normal, com uma variabilidade semelhante, com exceção do Duto 1 e do Duto 3, com a maior e a menor

variabilidade, respectivamente. Ademais, ao que parece, o Duto 3 apresentou menores valores de porcentagem de turbidez remanescente, seguido do Duto 5.

No digrama de caixas da eficiência de remoção de turbidez por duto (Figura 74), foi possível observar uma semelhança entre as medianas dos dutos, porém uma variabilidade maior dos dados pertencentes ao Duto 1. O terceiro quartil foi bem similar para todos os dutos, próximo à eficiência de 98%.

Comparando os dutos circulares, 1, 2 e 3; houve uma tendência de uma maior concentração de valores em eficiências mais elevadas (variar menos), à medida que se diminui o diâmetro da seção. Por exemplo, 50% dos dados de eficiência do Duto 1 ficaram entre 86% e 98%, enquanto do Duto 3, de menor diâmetro, entre 94% e 98%. Ou seja, quanto menor o diâmetro, aparentemente melhor foi a eficiência de remoção de turbidez no duto.

No caso dos dutos losangulares, 4 e 5, houve menor diferença entre a distribuição dos valores de eficiência, até porque a diferença de tamanho entre esses dutos é menor. O Duto 4 possui valores menores de eficiência dentro da faixa não discrepante, o que indica uma superioridade da eficiência do Duto 5, de menor tamanho da seção.

Neste diagrama, as distribuições referentes aos dutos 3 e 5 foram bem similares, com 50% dos dados variando entre 94 e 98% de eficiência. Comparando ainda esses dois dutos, houve menor número de outliers no duto 5 e um faixa de valores não discrepantes levemente superior ao duto 3. Lembrando que o Duto 3 possui uma altura vertical da seção 14 mm menor que o Duto 5. Isso demonstra que, mesmo com distância maior a ser percorrida pelo floco que entra em posição mais desfavorável, aparentemente o formato losangular apresentou eficiência similar ao menor duto circular, embora este último ainda apresente valores de turbidez da água decantada mais satisfatórios.

Comparando ainda o formato, agora entre os dutos 2 e 5, de mesma altura vertical da seção, nota-se uma aparente maior variabilidade da eficiência no Duto 2, com o intervalo interquartil entre 91 e 98%. Desse modo, de acordo com esse diagrama, há uma superioridade da eficiência dos dutos de formato losangular, quando comparado ao formato circular, para mesmo comprimento relativo (ou seja, considerando mesma distância vertical e longitudinal para floco percorrer e ser removido). Todavia, vale lembrar que os valores de turbidez da água decantada, foram similares entre esses dutos (Tabela 12), que é o quesito mais relevante por ser o produto final.

Os tubos horizontais testados no trabalho de Hansen e Culp (1967) com diâmetro da seção de 12,7 e 25,4 mm apresentaram eficiência de remoção de turbidez elevada, variando entre 95 e 97%, para diferentes comprimentos dos tubos (de 0,61 a 2,44 m), ao tratar uma

água bruta de turbidez igual a 450 uT sem o uso de polieletrólitos. O Duto 3 do presente estudo (diâmetro igual a 21 mm) obteve eficiência semelhante, com média de 95,2%, e a maioria dos dados variando entre 94 e 98% de remoção de turbidez.

Os autores também testaram tubos horizontais com 51 mm de diâmetro, que resultou em eficiências entre 83 e 95%. Com uma eficiência média de remoção de turbidez igual a 90,4%, o Duto 1 utilizado neste trabalho (de diâmetro igual a 54 mm) apresentou a maioria dos valores variando entre 86 e 98%, valores similares aos de Hansen e Culp (1967).

Calculou-se a porcentagem de cor aparente remanescente, aplicando um posterior logaritmo para avaliar as variabilidades no diagrama de caixas, mostrado na Figura 75. Já a distribuição dos dados de eficiência de remoção de cor aparente por duto encontra-se no diagrama de caixas da Figura 76.

Figura 75 – Diagrama de caixas da porcentagem de cor parente remanescente na água decantada por duto.

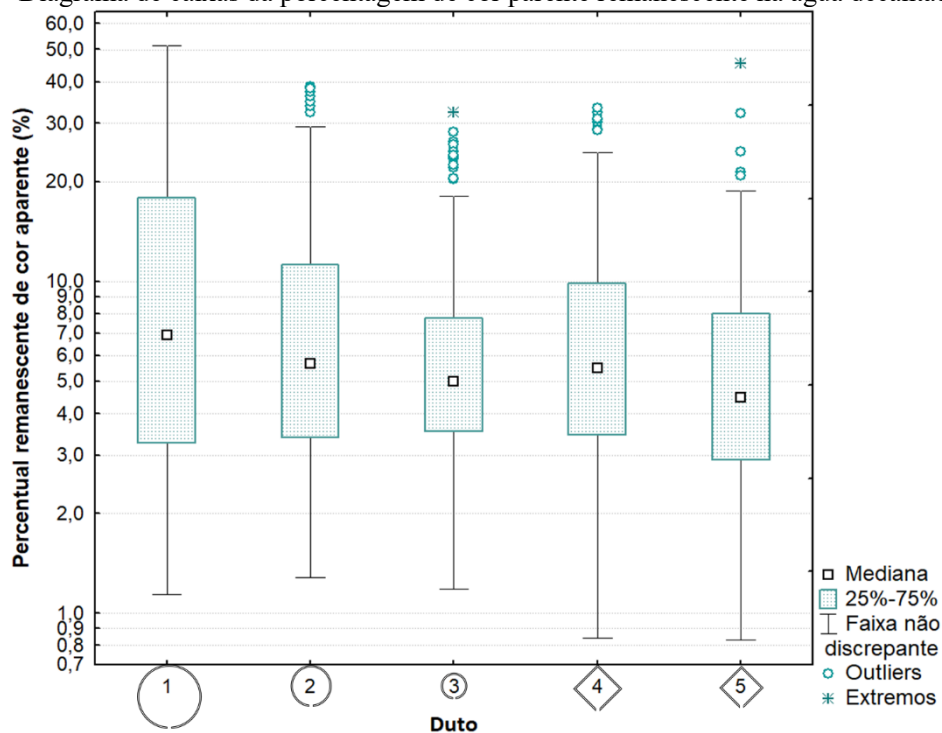
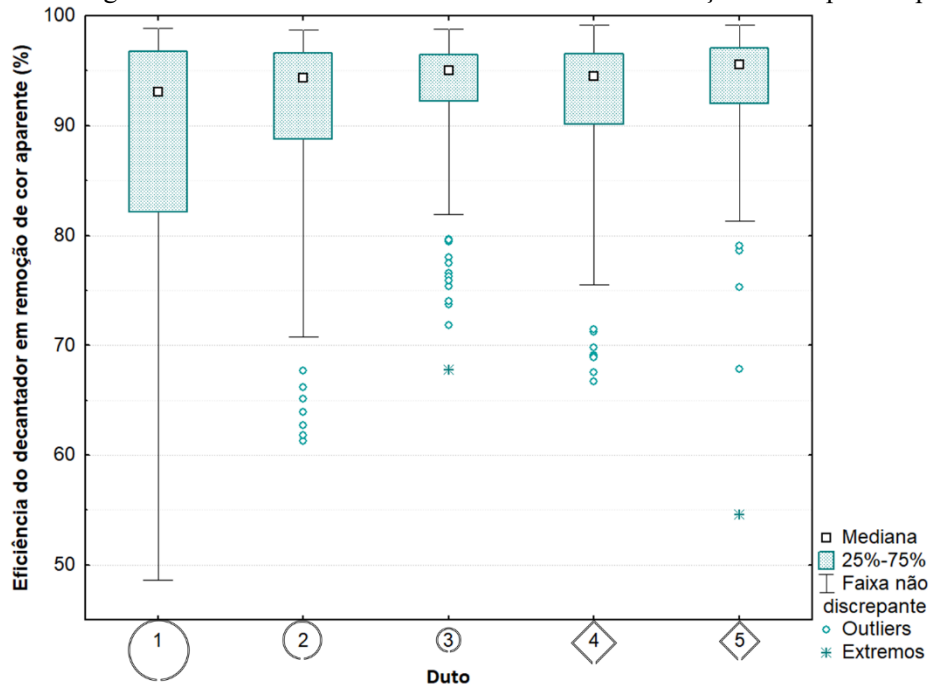


Figura 76 – Diagrama de caixas da eficiência do decantador em remoção de cor aparente por duto.



Avaliando ambos os gráficos, nota-se que houve dois valores extremos. No Duto 3, o valor ainda se encontra próximo das demais medições, não causando alteração significativa na análise estatística. Já para o duto 5, o valor extremo da eficiência de remoção foi de aproximadamente 55%, distando do restante da distribuição. Dessa forma, para evitar influências externas nos resultados, o mesmo foi excluído nos testes de inferência estatística.

O comportamento do diagrama de caixas da eficiência de remoção de cor aparente por duto foi semelhante ao da turbidez. Os dutos 3 e 5 obtiveram uma visível maior eficiência, devido ao menor tamanho da seção transversal. Comparando os dutos 2 e 5, ao que tudo indica, há uma eficiência superior do formato losangular.

5.3.2 Inferência Estatística: Teste de Hipóteses de Médias

O Teste de Hipóteses de médias unilateral à direita, verificou se é possível afirmar a superioridade estatística da média da eficiência de remoção de sólidos do duto B em relação ao A. Essa remoção de sólidos foi avaliada quanto à remoção de turbidez e cor aparente.

Os parâmetros calculados para se obter a medida estatística com distribuição t de Student e o grau de liberdade estão apresentados na Tabela 15, no caso, o número de dados válidos (n), a média da eficiência de remoção de turbidez (μ_E) e a variância amostral (s^2).

Tabela 15 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez.

Duto	n	μE	s^2
1	213	90,4	109,5
2	246	93,5	41,0
3	236	95,2	15,7
4	246	94,3	26,0
5	256	95,6	11,5

Fazendo uma análise prévia apenas das eficiências médias dos dutos na Tabela 15, observa-se que os valores maiores foram para os dutos 5 (losangular menor) e 3 (circular menor). Nota-se que a média da eficiência se elevou com a diminuição do diâmetro dos dutos circulares, e que o duto losangular um pouco menor possui eficiência superior ao outro de mesmo formato, de tamanho maior. Além disso, a eficiência média do Duto 5 foi superior ao Duto 3, mesmo com mesma distância vertical para o floco percorrer.

A Tabela 16 mostra o resultado do Teste de Hipóteses para eficiência de remoção de turbidez, comparando dutos de diferentes tamanhos. Especifica também o motivo da comparação, os valores calculados dos graus de liberdade para cada amostra, o ponto crítico do intervalo de confiança ($-\alpha$) e a medida estatística (t_{obs}).

Tabela 16 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre os dutos de diferentes tamanhos, para $\alpha=1\%$.

G	Hipótese H1		Diminuição tamanho	$GL_A + GL_B = GL$	t_α	t_{obs}	pvalor	Resultado
	Duto A	Duto B						
1	μE duto 3	$> \mu E$ duto 1	maior	235+212=447	2,3	6,5	0,00%	H1
	μE duto 2	$> \mu E$ duto 1	regular	245+212=457	2,3	3,8	0,01%	H1
	μE duto 3	$> \mu E$ duto 2	sutil	235+245=480	2,3	3,7	0,01%	H1
2	μE duto 5	$> \mu E$ duto 4	muito sutil	255+245=500	2,3	3,2	0,09%	H1

Legenda: G = grupo.

Com um nível de significância (α) adotado de 1,0%, isto é, uma confiabilidade de 99,0%, constatou-se que um aumento do tamanho da seção, mesmo que muito sutil, já provoca uma diminuição na eficiência do decantador, em remoção de turbidez.

A título de verificar mais atentamente as mudanças de tamanho no Grupo 1 (dutos circulares) e Grupo 2 (dutos losangulares), observou-se as probabilidades de significância e as confianças específicas de cada comparação.

O teste em relação à mudança maior de tamanho (Duto 3 x Duto 1) apresentou um pvalor de praticamente 0%, isso indica que se pode comprovar com 100% de certeza que essa redução do diâmetro já promove uma melhora relevante na eficiência.

Observando as alterações regular e sutil no diâmetro (Duto 1 x Duto 2; e Duto 2 x Duto 3), com 99,99% de confiança, já pôde-se rejeitar H_0 , ou seja, uma diminuição dessa dimensão já promove um aumento na eficiência do decantador.

Com referência ao grupo dos dutos losangulares (Duto 4 x Duto 5), uma redução no tamanho muito sutil promoveu uma melhora com 99,91% de confiabilidade.

A eficiência do decantador aumenta com a diminuição do tamanho da seção do duto devido a uma menor distância vertical que o floco precisa percorrer para ser removido através da abertura longitudinal inferior do duto.

De fato, diversos autores já constaram que, quanto menor a distância que a partícula floculenta necessita percorrer para ser removida, maior a eficiência do decantador.

Nas pesquisas realizadas com decantadores do tipo tubular horizontal, Hansen e Culp (1967) verificaram que quanto menor o diâmetro dos dutos de sedimentação, maior a eficiência do decantador. Isso também pôde ser comprovado na nova concepção de dutos horizontais de sedimentação, com abertura longitudinal inferior, para as condições testados neste estudo.

A Tabela 17 apresenta o resultado do Teste de Hipóteses para a eficiência de remoção de turbidez, comparando dutos de diferentes formatos.

Tabela 17 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre os dutos de diferentes formatos, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H_1	Mudança	$GL_A + GL_B = GL$	$t\alpha$	t_{obs}	pvalor	Resultado
μE duto 5 > μE duto 2	formato	245+255=500	2,3	4,5	0,00%	H1

Com esse mesmo grau de confiança, também foi possível confirmar a influência da mudança da forma de circular para losangular no aumento da eficiência.

Examinando melhor a mudança de formato, nota-se que o pvalor resultou em aproximadamente 0, ou seja, com uma confiabilidade de 100%, pode-se confirmar a influência da mudança do formato circular para losangular provoca melhora na eficiência do decantador.

Mesmo com mesma distância vertical para o floco ser removido, o Duto 5 apresentou superioridade na eficiência em relação ao Duto 2. Essa superioridade aparentemente está relacionada com a capacidade de autolimpeza do formato losangular.

Tabela 18 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de cor aparente entre os dutos, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1		Motivo	t α	t _{obs}	pvalor	Resultado
Duto A	Duto B					
μE duto 3 > μE duto 1		Tamanho	2,3	9,7	0,00%	H1
μE duto 2 > μE duto 1		Tamanho	2,3	6,1	0,00%	H1
μE duto 3 > μE duto 2		Tamanho	2,3	3,2	0,09%	H1
μE duto 5 > μE duto 4		Tamanho	2,3	2,6	0,52%	H1
μE duto 5 > μE duto 2		Formato	2,3	3,9	0,00%	H1

O teste de hipóteses para a eficiência de remoção de cor aparente resultou em H1 para todas as comparações. O resultado foi análogo ao de remoção de turbidez, assim, com uma confiabilidade de 99%, pôde se afirmar que uma diminuição do tamanho da seção do duto, mesmo que sutil, promove um aumento significativo da eficiência em remoção de cor aparente. Como também foi possível afirmar que o uso do duto de formato losangular, ao invés de circular, provocou melhoria significativa da eficiência de remoção do mesmo parâmetro.

5.3.2.1 Teste de hipóteses observando a diferença temporal presente na Etapa 1

Ao analisar os dados de forma temporal, deve-se observar a diferença entre dois grupos de medição: o grupo inicial, da 1ª à 12ª operação (enquanto estava instalado o tê de distribuição) e o grupo final, da 13ª à 27ª operação (uso do *manifold* para distribuição da água floculada). Lembrando que as operações 9 e 10 foram excluídas da análise.

A diferença foi comprovada estatisticamente mediante a um teste de hipótese bilateral de comparação de médias, com nível de significância de 1,0%, como mostra a Tabela 19.

Tabela 19 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência de remoção de turbidez entre o grupo inicial e final das operações, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1	Mudança	$GL_A + GL_B = GL$	-t $_{\alpha/2}$	+t $_{\alpha/2}$	t _{obs}	pvalor	Resultado
μE inicial \neq μE final	Troca de Tê por <i>manifold</i>	439+757 = 1196	-2,6	2,6	18,3	0,00%	H1

A partir do teste de hipótese bilateral, comprovou-se, com 99% de confiança, que os dois grupos são diferentes entre si. Observando o pvalor, isso poderia ser comprovado também 100,00% de certeza.

Como houve diferenciação estatística entre os grupos, o Teste de Hipóteses foi realizado novamente, aplicando-o separadamente para cada um dos grupos e observando se houve a manutenção das tendências.

Os dados estatísticos para a realização do teste de hipótese referente à turbidez da água para as operações iniciais (antes da instalação do *manifold*), bem como o teste em si encontram-se respectivamente na Tabela 20 na Tabela 21.

Tabela 20 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez das operações iniciais.

Duto	n	μE	s^2
1	80	80,0	92,99
2	90	87,9	53,87
3	80	93,5	32,34
4	90	90,2	37,11
5	100	93,6	13,21

Tabela 21 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de turbidez entre os dutos, durante as operações iniciais, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1		Motivo	- α	t_{obs}	pvalor	Resultado
Duto A	Duto B					
μE duto 3 > μE duto 1		Tamanho	2,3	10,8	0,00%	H1
μE duto 2 > μE duto 1		Tamanho	2,3	4,6	0,00%	H1
μE duto 3 > μE duto 2		Tamanho	2,3	5,9	0,00%	H1
μE duto 5 > μE duto 4		Tamanho	2,3	5,7	0,00%	H1
μE duto 5 > μE duto 2		Formato	2,3	6,7	0,00%	H1

Para as operações iniciais, em que a turbidez da água floculada manteve-se com uma variabilidade menor da turbidez, pôde-se comprovar estatisticamente, com 1% de nível de significância, a influência da redução do tamanho e da mudança para o formato losangular no aumento da eficiência na remoção de turbidez. A análise ainda se torna confiável devido à grande quantidade de dados por duto ($n > 30$), mesmo após a segregação.

Finalizando a análise da remoção de turbidez após a segregação temporal em dois grupos, os dados estatísticos referentes à turbidez da água nas operações finais necessários para a realização do teste de hipóteses, assim como os resultados do teste, estão dispostos na Tabela 22 e na Tabela 23, respectivamente.

Tabela 22 – Número de dados válidos, média, variância e variância relativa amostral, em relação à eficiência de cada duto quanto à remoção de turbidez das operações finais.

Duto	n	μE	s^2
1	134	96,6	6,47
2	156	96,7	5,07
3	156	96,1	4,83
4	156	96,7	4,01
5	156	96,8	6,39

Tabela 23 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da eficiência remoção de turbidez entre os dutos das operações finais, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1		Motivo	-ta	t _{obs}	pvalor	Resultado
Duto A	Duto B					
μE duto 3 > μE duto 1		Tamanho	2,3	-1,8	95,98%	H0
μE duto 2 > μE duto 1		Tamanho	2,3	0,3	38,19%	H0
μE duto 3 > μE duto 2		Tamanho	2,3	-2,3	98,89%	H0
μE duto 5 > μE duto 4		Tamanho	2,3	0,4	34,79%	H0
μE duto 5 > μE duto 2		Formato	2,3	0,4	33,16%	H0

Com um nível de significância de 1%, não se pode rejeitar a hipótese H0 para nenhum desses casos para as operações finais. Não quer dizer que não haja superioridade entre a eficiência de um duto e outro, apenas não houve uma comprovação estatística.

É importante ressaltar que o principal motivo para a ausência de correlação entre geometria e eficiência nesse caso possivelmente foi a grande dispersão dos dados de água floculada. Por conseguinte, como em cada amostra o decantador tratava uma água com diferentes características, isso foi um grande influente externo que sobrepujou a influência da alteração da geometria.

5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA TAXA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL MÁXIMA ADMISSÍVEL (FASE I – ETAPA 2)

Durante a operação, todos os dutos atingiram uma vazão máxima de $1,3 \pm 0,1$ L/min. Cada duto atingiu a respectiva taxa de escoamento máxima quando toda a vazão do sistema (1,9 L/min) foi aplicada unicamente no duto analisado. Essa diferença de $0,6 \pm 0,1$ L decorreu da perda de carga nos registros de pressão, na saída de água decantada, os quais provocavam uma elevação do nível d'água no interior do decantador até seu transbordamento.

Concluiu-se que a borda livre do decantador foi subdimensionada para esse teste, pois não foi possível aumentar a vazão suficientemente no duto para apenas a qualidade da água decantada (adotada como 2 uT) ser um fator limitante na determinação da taxa de escoamento superficial máxima admissível. Em geral, o teste realizado em cada duto foi interrompido apenas pelo transbordamento da unidade piloto.

5.4.1 Análise Estatística Descritiva

A distribuição dos dados de taxa de escoamento superficial se adequou mais à distribuição Lognormal, como pode se observar na Figura 77. Por isso, o eixo das ordenadas dos gráficos posteriores estão em escala logarítmica. Na Figura 78, pode-se observar os valores de taxa de escoamento superficial por duto.

Nesse diagrama, foram representados todos os valores de taxa assumidos para operação de cada duto, no qual buscou-se iniciar com vazões mínimas (taxas menores) e ir elevando a taxa gradativamente. Nitidamente, o Duto 3 se destacou dentre os demais dutos, alcançando uma taxa máxima consideravelmente superior, próximo a $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Além disso, visivelmente, a metade superior dos valores do Duto 3 adquiriram uma taxa superior a praticamente todas as taxas dos outros dutos.

Figura 77 – Distribuição dos dados taxa em relação à distribuição teórica Lognormal.

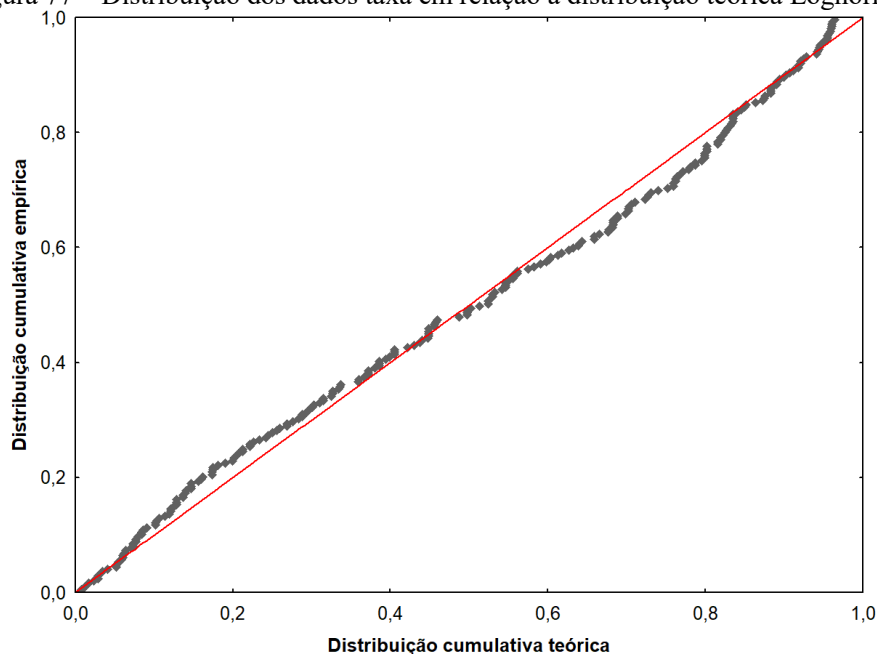
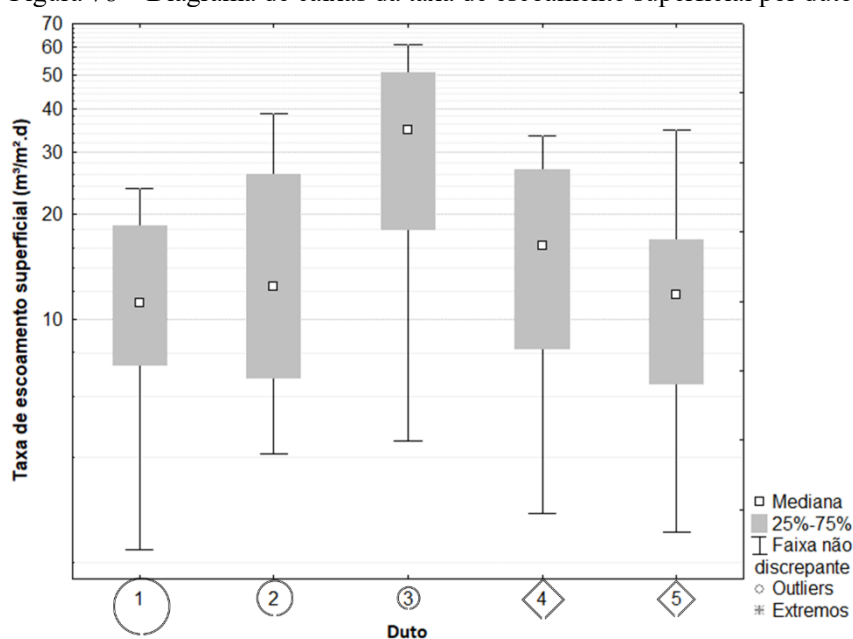


Figura 78 – Diagrama de caixas da taxa de escoamento superficial por duto.



Avaliando o Duto 5, nota-se que houve uma grande quantidade de dados referentes à taxa menores que o Duto 4 (maior tamanho). Isso se deu, pois havia um defeito no registro de pressão de saída do Duto 5, o que reduziu a vazão máxima admissível. Após a detecção do problema, trocou-se a válvula e foram refeitas algumas operações, atingindo a descarga máxima, de 1,3 L/min, como nos demais.

Como objetivo é avaliar a influência da geometria da seção do duto na taxa máxima admissível, foi realizado um ranqueamento da taxa escoamento superficial máxima obtida em cada duto, organizados em ordem decrescente, isto é, da maior taxa para a menor (Tabela 24).

Tabela 24 – Ranqueamento da taxa de escoamento superficial máxima admitida em cada duto

Ranking	Duto	Símbolo	Taxa máxima admitida (m ³ /m ² .d)
1º	3	◦	61,0
2º	2	○	38,8
3º	5	◇	34,8
4º	4	◇	33,3
5º	1	○	23,7

O ranqueamento apresentado corresponde à taxa máxima das máximas, isto é, a maior taxa de escoamento superficial alcançada para cada duto. Nota-se que, visivelmente, a redução de tamanho do duto já bastou para alcançar uma taxa mais elevada. Entretanto, não foi possível chegar a uma conclusão prévia acerca da relevância do formato. Os problemas com o registro do Duto 5 podem ter atuado como um influente externo, que prejudicaram seus resultados.

5.4.2 Inferência Estatística: Teste de Hipóteses de Médias

Além da análise das taxas máximas de escoamento superficial para cada duto através do ranqueamento, foi realizado um teste de hipótese estatístico, comparando a média das cinco taxas máximas de cada experimento por duto.

O resultado para verificar se há superioridade estatística entre os valores médios das máximas está apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da taxa de escoamento superficial máxima (q) entre os dutos de diferentes tamanhos, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1		Diminuição tamanho	GL	t_α	t_{obs}	pvalor	Resultado
Duto A	Duto B						
μ_q duto 3	$>$ μ_q duto 1	maior	8	2,90	64,6	0,00%	H1
μ_q duto 2	$>$ μ_q duto 1	regular	8	2,90	11,7	0,00%	H1
μ_q duto 3	$>$ μ_q duto 2	sutil	8	2,90	18,8	0,00%	H1
μ_q duto 5	$>$ μ_q duto 4	muito sutil	8	2,90	5,6	0,02%	H1

Foi comprovada, com uma confiança de 99%, a superioridade estatística das taxas máximas dos dutos de menores tamanhos da seção, mesmo para uma diminuição de tamanho muito sutil. Analisando os resultados obtidos a partir do pvalor, é possível confirmar, com 0,00% de erro, que uma redução do tamanho, ainda que sutil é suficiente para aumentar a taxa. A chance de erro para uma alteração muito sutil é de 0,02%, reforçando a relevância da influência do tamanho na taxa de escoamento superficial.

Dessa forma, sugere-se a adoção de dutos de seção transversal menor na elaboração e planejamento de decantadores desse tipo, tanto para aumentar a eficiência de remoção de turbidez, quanto para otimizar a taxa de escoamento superficial.

O resultado do teste estatístico entre os valores médios das taxas máximas entre os dutos de diferente formato está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultado do teste de hipóteses, comparando as médias da taxa de escoamento superficial máxima (q) entre os dutos de diferentes formatos, para $\alpha=1\%$.

Hipótese H1	Mudança	GL	$t\alpha$	t_{obs}	pvalor	Resultado
μ_q duto 5 > μ_q duto 2	formato	8	2,90	-2,2	96,93%	H0
μ_q duto 2 > μ_q duto 5	formato	8	2,90	2,2	3,07%	H0

Ao realizar uma comparação entre os dutos de diferentes formatos, esperava-se que o duto losangular obtivesse uma taxa de escoamento superficial mais elevada, como ocorreu com a eficiência de remoção de turbidez. Entretanto, antes da execução do teste de hipótese, é possível observar que o duto losangular (5) alcançou uma média amostral inferior à do duto circular de mesma altura da seção (2), possivelmente devido à presença de mais operações com o registro de saída antigo.

Como o resultado foi H0, há uma improbabilidade estatística em se provar estatisticamente que o losangular foi melhor, como está refletido no pvalor (erro de 96,93% ao se inferir em H1).

Ao se aplicar o teste de hipótese contrário, isto é, tentando verificar se o Duto 2 apresentou uma taxa de escoamento superficial média superior à do Duto 5, o resultado final também foi H0. Isso significa que não foi possível estabelecer se há uma superioridade estatística entre eles. Dessa forma, não é possível, a partir dos dados apresentados, inferir que o formato da seção está influenciando no aumento da taxa.

5.4.3 Relação entre Taxa e Eficiência

Como complemento às análises apresentadas, buscou-se verificar, de forma preliminar, uma relação entre a taxa de escoamento superficial e a eficiência de remoção de turbidez na segunda etapa de aplicação do Decantador 1. A Tabela 27 apresenta a análise estatística descritiva dos principais parâmetros medidos ao longo da Etapa 2.

Tabela 27 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase I, Etapa 2.

Parâmetro	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	
Taxa de escoamento longitudinal (cm/min)	19,7 ± 2,0	15,5	13,3	2,2	61,0	14,5 ± 1,6	
Turbidez (uT)	Água bruta	119 ± 1	116	120	110	138	6 ± 1
	Água floculada	74,7 ± 4,3	70,1	114	26,8	137	31,2 ± 3,3
	Água decantada	0,80 ± 0,04	0,73	1,14	0,45	1,95	0,29 ± 0,03
Eficiência remoção de turbidez (%)	Decantador	98,9 ± 0,1	98,9	99	97,0	99,7	0,4 ± 0,0
	Sistema	99,3 ± 0,0	99,4	99	98,6	99,6	0,2 ± 0,0
Cor aparente (uH)	Água bruta	1515 ± 10	1472	1580	1440	1771	73 ± 8
	Água floculada	788 ± 40	743	709	163	1829	286 ± 31
	Água decantada	15 ± 1	14	13	6	39	5 ± 1
Eficiência remoção de cor aparente (%)	Decantador	97,8 ± 0,2	98,1	Múltipla	90,2	99,3	1,1 ± 0,1
	Sistema	99,0 ± 0,0	99,0	99,1	97,5	99,6	0,3 ± 0,0

Destaca-se na análise da Tabela 27, que as eficiências médias de remoção de turbidez e cor aparente foram iguais a $98,9\% \pm 0,1\%$ e $97,8\% \pm 0,2\%$, respectivamente, consideradas elevadas, de acordo com o apresentado na literatura.

Observa-se que, mesmo regulando a taxa de escoamento superficial ao máximo, não houve redução na eficiência média de remoção de turbidez do Decantador 1 em comparação com a Etapa 1 cujas taxas eram menores e constantes, inclusive, houve aumento. Isso provavelmente se deu devido a influentes externos, como temperaturas mais elevadas e melhor eficiência no processo de coagulação e floculação.

Além de compreender uma elevada eficiência, o decantador também foi eficaz na Etapa 2, fornecendo concomitantemente uma água decantada de excelente qualidade, cuja média foi de $0,80 \pm 0,04$ uT, um valor próximo inclusive de saída de filtro. Os histogramas de frequência da turbidez da água decantada e da eficiência de remoção deste parâmetro estão ilustrados na Figura 79 e Figura 80.

A turbidez da água decantada durante a Etapa 2 (Figura 79) ficou 95% do tempo menor do que 1,4 uT e mais da metade do tempo menor que 0,8 uT.

Ao analisar a Figura 80, primeiramente nota-se que em 100% do tempo os dados observados obtiveram uma eficiência de remoção de turbidez superior a 97%. Além disso, em 95% do tempo, os dados de eficiência foram superiores a 98% de remoção, o que denota um ótimo funcionamento da unidade de tratamento nesta etapa.

Figura 79 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada pelo Decantador 1, na Etapa 2.

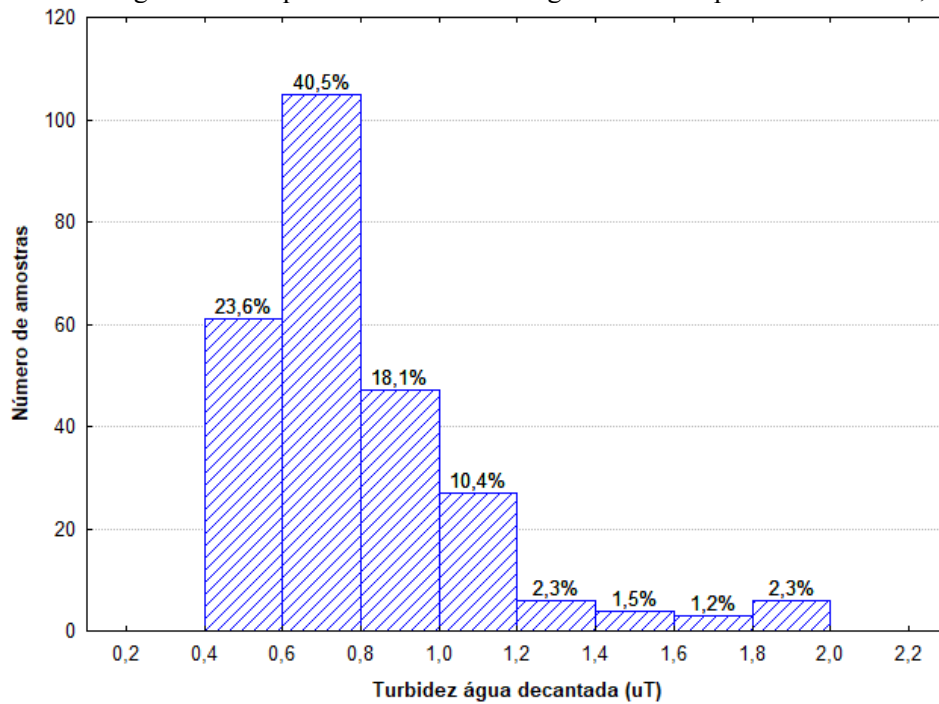
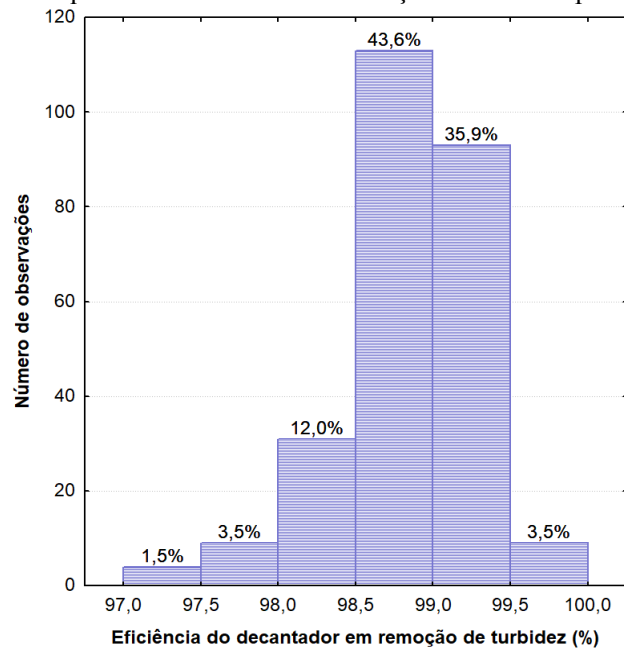
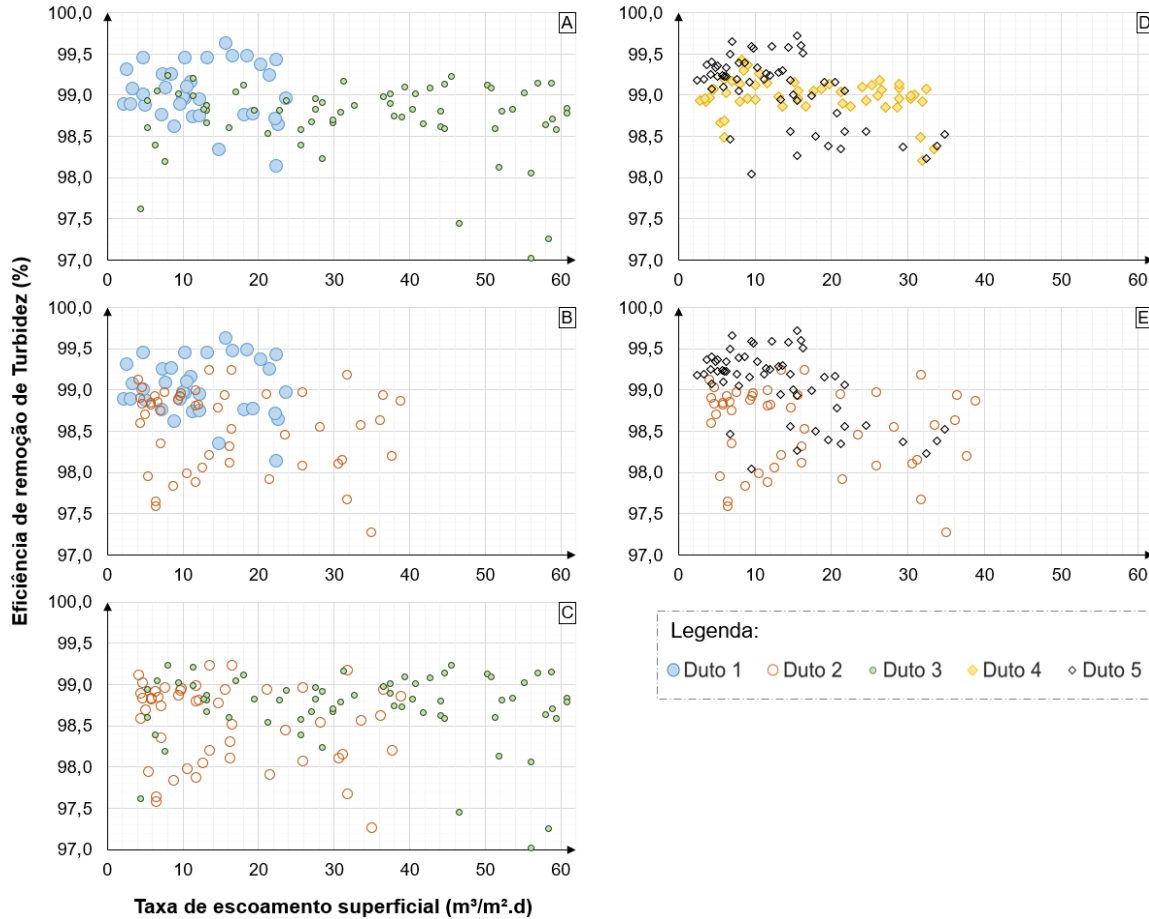


Figura 80 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de turbidez pelo Decantador 1, na Etapa 2.



A relação entre taxa de escoamento superficial e eficiência para as diferentes comparações de dutos pode ser vista na Figura 81.

Figura 81 – Diagrama de dispersão da taxa de escoamento superficial em relação à eficiência de remoção de turbidez, para cada duto, agrupando-os de forma a comparar o tamanho e formato da seção.



A: Duto 1-3: mudança de tamanho; B: Comparação Duto 1-2; C: Comparação Duto 2-3; D: Comparação Duto 4-5; E: Comparação Duto 2-5.

Através dos diagramas de dispersão, não foi possível observar, em nenhum duto, uma redução significativa na eficiência de remoção de turbidez com o aumento da taxa de escoamento superficial.

Comparando os dutos circulares através do tamanho, pode-se notar que o Duto 3 visivelmente atingiu taxas de escoamento superiores para boa parte dos valores, se comparado ao Duto 1 e ao Duto 2. Ressalta-se, porém que o Duto 1 apresentou eficiências maiores que os demais, porque, durante a operação, houve uma obstrução quase total da seção devido ao lodo acumulado, que impediu os flocos de chegarem à zona de saída.

Ao se avaliar os dutos losangulares, deve-se considerar os problemas de operação decorridos no Duto 5. Dessa forma, houve poucas amostras com taxas de escoamento superficial elevadas nesse duto. Entretanto, confirmando o ocorrido na Etapa 1 do

Decantador 1, o Duto 5 apresentou nitidamente eficiências mais elevadas, apesar do problema apresentado.

Comparando os dutos de diferentes formatos, mas com altura equivalente, ressalta-se novamente uma maior eficiência aparente no Duto 5 (losangular), em relação ao Duto 2 (circular). A comparação das taxas torna-se prejudicada pelo defeito operacional no registro.

Corroborando os resultados do teste de hipóteses realizado na Etapa 1, que afirmou a influência do tamanho e formato da seção do duto na eficiência de decantação, na Etapa 2 foi repetido o teste, apenas para conferência, resultando em confirmação estatística para todos os casos.

De forma a realizar uma comparação entre as variáveis, foi construída uma tabela de correlação, através dos coeficientes não paramétricos Spearman e Gamma, como mostra a Tabela 28.

Tabela 28 – Coeficiente de correlação entre as variáveis apresentadas para Etapa 2 do Decantador 1.

Spearman \ Gamma	Taxa de Escoamento Superficial	Eficiência de remoção de turbidez	Eficiência de remoção de cor aparente
Taxa de Escoamento Superficial		<u>-0,189</u>	<u>-0,238</u>
Eficiência de remoção de turbidez	<u>-0,290</u>		<u>0,650</u>
Eficiência de remoção de cor aparente	<u>-0,361</u>	<u>0,830</u>	

Observação: Os valores em sublinhado apresentam um pvalor $< \alpha$, isto é, apresentam correlação estatística.

Pela Tabela 28, nota-se que, para todas as relações entre as variáveis, há um coeficiente de correlação significativo, para um nível de significância de 1%. Isto é, mesmo com a relação não visível através dos gráficos de dispersão, pode-se afirmar, com 99% de confiança, pelos coeficientes não paramétricos, que há uma correlação entre a taxa de escoamento superficial e a eficiência na remoção de turbidez ou cor aparente. As correlações são negativas, o que indica que as grandezas são inversamente proporcionais, ou seja, o aumento da taxa promove uma redução de ambas as eficiências, conforme constata-se na literatura.

Comparando a eficiência de remoção de turbidez com a eficiência de remoção de cor aparente, tanto para Gamma, quanto para Spearman, houve uma correlação entre as variáveis, com 1% de chance de erro, e ambas correlações foram fortes (entre 0,70 e 0,89).

Vale-se ressaltar, que, para haver uma análise mais precisa, seria necessário realizar um agrupamento de variáveis equivalentes, a partir de uma análise multivariada.

5.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA SEÇÃO DOS DUTOS NA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA (FASE I – ETAPA 1, 2 E 3)

5.5.1 Análise dos Critérios de Autolimpeza

A análise visual da capacidade de autolimpeza dos dutos de sedimentação do Decantador 1, foi descrita a seguir para cada critério adotado de avaliação, observados nas Etapas 1, 2 e 3.

5.5.1.1 Critérios 1 e 2 – retorno de flocos pela abertura longitudinal inferior

Visualmente, os flocos que saíam através da abertura longitudinal inferior dos dutos não retornavam mais ao seu interior (critério 1), nem mesmo se movimentavam em direção aos outros dutos (critério 2). Na Figura 82, é possível perceber o comportamento descendente dos flocos, que se moviam diretamente para o fundo do decantador, aparentando formar um feixe de flocos em linha, posicionado exatamente no mesmo eixo longitudinal da abertura inferior.

O fato de os dutos do Decantador 1 serem distribuídos paralelamente no plano horizontal e de não haver correntes de água garantiu ainda mais que os flocos provenientes de um duto não adentrassem pela abertura dos outros dutos.

Na Etapa 3, ficou mais nítida essa constatação, pois se notou de modo claro a trajetória dos flocos que saem através da abertura longitudinal inferior dos dutos e se de dirigem para a zona de lodo (Figura 83).

Figura 82 – Imagem aproximada de um duto circular, para mostrar o comportamento típico dos flocos ao saírem através da abertura longitudinal inferior nas Etapas 1 e 2.



Figura 83 – Comportamento típico dos flocos ao saírem através da abertura longitudinal inferior dos dutos horizontais na Etapa 3.



5.5.1.2 Critério 3 – Formação de camada de lodo revestindo superfície dos dutos

Praticamente não houve formação de camada de lodo no perímetro interior dos dutos, assim como, não houve variação visual conforme o formato e tamanho da sessão nesse aspecto. Provavelmente isso foi devido ao fluxo de água, que constantemente ia removendo qualquer resíduo nas paredes internas. O pouco de incrustação que pode ter sido formada, deveu-se aos momentos em que o decantador ficava em repouso, cheio de água, entre uma operação e outra.

A camada de lodo apenas se formou na parte externa dos dutos (Figura 84), caracterizada por fina película ao longo de toda a extensão da superfície, que, inclusive, por vezes impediu a visualização do interior dos dutos. Entende-se que essa formação foi decorrente da estagnação da água em que os dutos do decantador estavam imersos. Acredita-se ter relação com a presença de partículas finas de argila que, à primeira vista, são invisíveis a olho nu, porém quando se acumulam ao redor dos dutos, nota-se seu aspecto.

Figura 84 – Camada de lodo sobre os dutos de sedimentação, na parte externa.



5.5.1.3 Critério 4 – Acúmulo de lodo no fundo dos dutos

O acúmulo de lodo no fundo dos elementos de sedimentação ocorreu principalmente nos dutos circulares, devido ao fato de próximo à abertura longitudinal inferior não haver inclinação suficiente para os flocos deslizarem, isto é, a superfície nessa região é praticamente plana (na horizontal). O depósito de lodo nessa região dos dutos circulares foi aumentando ao longo do período de duração das operações. Na Etapa 1, a duração de 2 h já era o suficiente para ocorrer obstrução parcial da seção dos dutos circulares.

Aparentemente, essa obstrução foi proporcional ao tamanho da seção nos dutos circulares, com exceção do Duto 1, que pareceu possuir maior volume de lodo acumulado na região do fundo próximo à abertura, de modo desproporcional quando comparado aos outros dutos. Entretanto, acredita-se que tal fato tenha relação com a desproporção entre o diâmetro da seção transversal e a largura de sua abertura inferior, a qual pode ter sido ínfima demais. Na Figura 85 pode-se perceber o acúmulo de lodo típico nos dutos circulares, especificamente nos dutos 1 e 2, e com ênfase no acúmulo excessivo no Duto 1.

Figura 85 – Depósito de lodo nos dutos circulares, com volume considerável de lodo no fundo.



A diferença de tamanho entre os dutos losangulares pareceu não ter influenciado significativamente no acúmulo de lodo. Nesses dutos, ocorreu depósito menor de lodo no fundo, próximo a abertura longitudinal inferior; onde formavam-se aglomerações esparsas ao longo do comprimento Figura 86. Desse modo, o formato da seção influenciou determinantemente no acúmulo de lodo no interior dos dutos, sendo o losangular com maior capacidade de expulsar os flocos, ou seja, mais autolimpante.

Figura 86 – Depósito de lodo nos dutos losangulares com formações esparsas ao longo do comprimento.



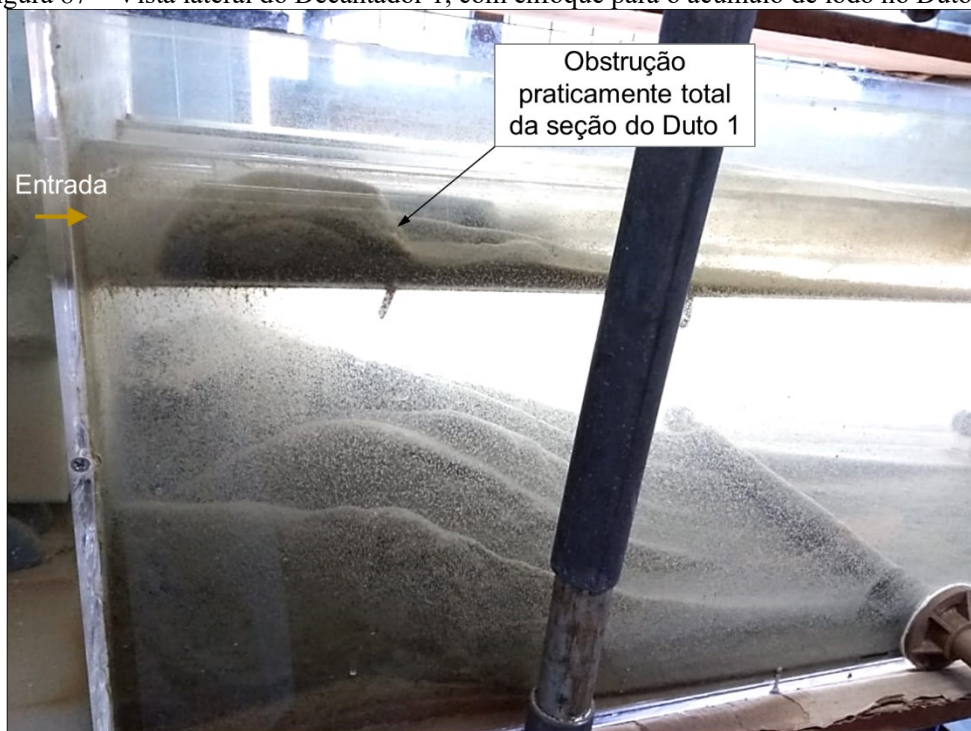
5.5.1.4 Critério 5 – Obstrução da seção transversal

Em nenhuma das etapas da Fase I houve obstrução completa da seção dos dutos com impedimento do fluxo de água floculada, o que é um bom indicativo de autolimpeza.

Entretanto, na Etapa 2 da Fase I, ocorreu um comportamento atípico no Duto 1, onde a aplicação de uma vazão mais elevada culminou em uma turbulência no trecho de transição entre a entrada do duto e o escoamento desenvolvido no seu interior. Essa turbulência fez com que a maioria das partículas já sedimentasse nos primeiros centímetros do comprimento do Duto 1. O armazenamento foi tal que a seção transversal ficou praticamente obstruída algumas vezes, como demonstra a imagem da Figura 87.

A turbulência na zona de transição de entrada é um fator que deve ser estudado principalmente para o caso dos dutos circulares, para a sedimentação excessiva não ocasionar um acúmulo de lodo, visto que esse formato favorece o acúmulo na base do duto ao invés da eliminação através da abertura longitudinal inferior (considerando a largura da abertura utilizada no experimento).

Figura 87 – Vista lateral do Decantador 1, com enfoque para o acúmulo de lodo no Duto 1.



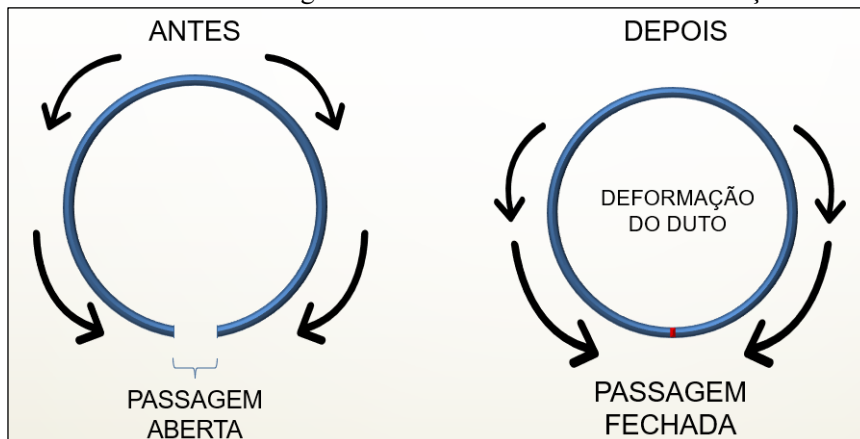
Como pode se observar na Figura 87, os flocos sedimentaram na primeira porção do Duto 1 e foram se aglutinando, gerando um acúmulo de volume considerável, com consistência suficiente para não atravessar a abertura longitudinal inferior do referido duto.

5.5.1.5 Critério 6 – Obstrução da abertura longitudinal inferior

Notou-se que o formato dos dutos circulares se modificou levemente (devido à tensão do material em acrílico). Já nas operações prévias à experimentação deste trabalho, a abertura longitudinal inferior cerrou-se com o peso da própria estrutura dos dutos, conforme a

ilustração da Figura 88. Isso ocorreu apenas para os dutos circulares, provavelmente devido à ausência de vértices na forma geométrica, indicando desvantagem estrutural neste formato.

Figura 88 – Fechamento da abertura longitudinal inferior decorrente da deformação nos dutos circulares.



Para solucionar este problema, foram introduzidos espaçadores nas aberturas inferiores ao longo do comprimento dos dutos circulares, com as larguras das aberturas respectivas de cada duto. O espaçador foi inserido de 20 em 20 cm aproximadamente. A Figura 89 mostra fotos do interior de um dos dutos circulares, primeiramente sem espaçadores, com a passagem quase fechada por completo, e depois, com a solução dos espaçadores.

Figura 89 – Duto com abertura inferior próximo de fechar (esquerda) e duto com espaçadores (direita).



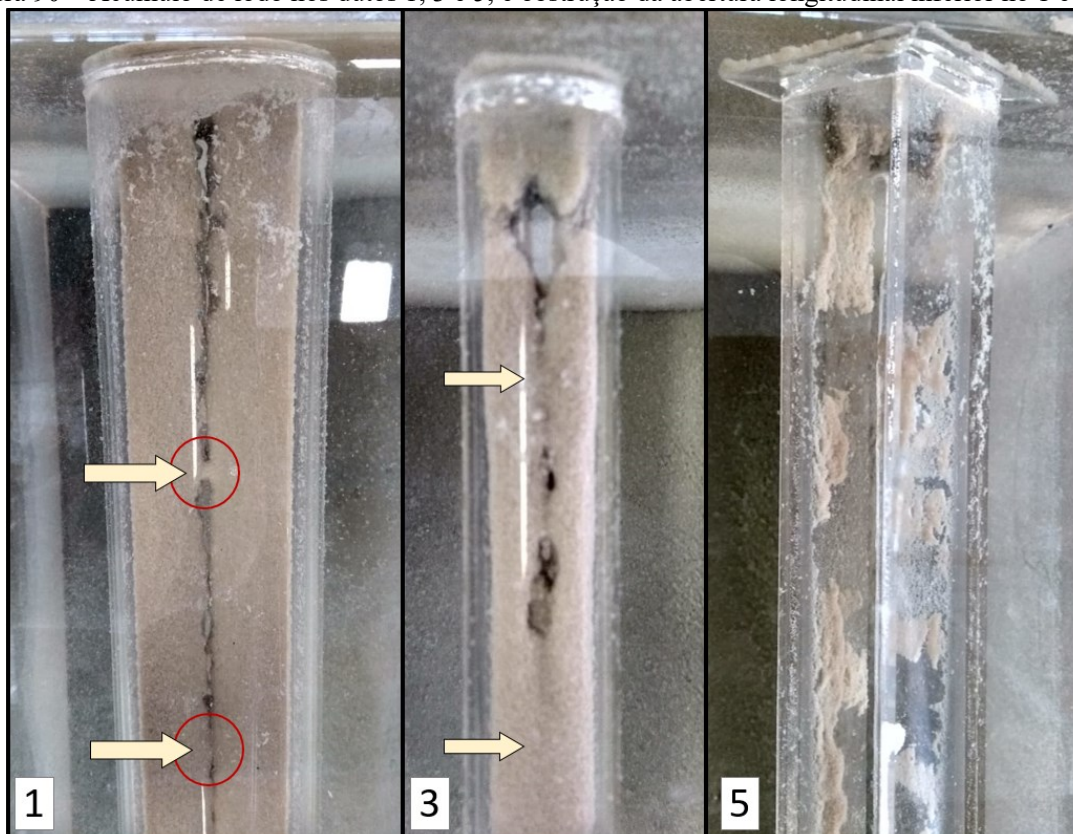
Os espaçadores inseridos nos dutos circulares, com função de manter a abertura longitudinal inferior, também serviram de base, mesmo que pequena, para os flocos acumularem. Essa obstrução pontual da abertura, com o passar do tempo de operação, foi aumentando, à medida que os flocos foram se depositando a partir deste ponto. Assim, em

alguns trechos ao longo do comprimento dos dutos circulares, houve flocos acumulados que impediram a passagem dos demais flocos através da abertura inferior.

Por não necessitarem dos espaçadores, os dutos losangulares raramente tiveram a ocorrência de obstrução da abertura inferior. As poucas vezes em que ocorreu, foi nos primeiros centímetros dos dutos, devido à turbulência do fluxo presente na região transitória da entrada.

Na Figura 90 são exibidos os dutos circulares 1 e 3 e duto losangular 5. No Duto 1, foi demonstrado o momento em que os flocos começam a se acumular sobre os espaçadores, formando pontos em que a passagem através da abertura ficou obstruída. O Duto 3 já se encontra em um estágio no qual o lodo acumulado apresentou maior volume sobre um espaçador, prologando a obstrução ao longo do comprimento. Em relação ao Duto 5, a imagem capturada reflete o aspecto do acúmulo de lodo na maior parte do tempo, com formações esparsas e em menor quantidade.

Figura 90 – Acúmulo de lodo nos dutos 1, 3 e 5, e obstrução da abertura longitudinal inferior no 1 e no 3.



5.5.1.6 Critério 7 – Ocorrência de ressuspensão de flocos

Parte dos flocos que sedimentavam no interior dos dutos atravessava diretamente a abertura longitudinal inferior, sendo removida; outra parte se depositava na base do duto,

principalmente nos dutos circulares. Aparentemente, não ocorreu ressuspensão dos flocos na maioria dos dutos e, se houve, foi em escala imperceptível a olho nu. A única região em que foi observada uma certa ressuspensão dos flocos era na zona de transição da entrada dos dutos, onde havia uma turbulência que logo terminava após os primeiros centímetros do comprimento dos dutos.

Os flocos em trânsito no interior dos dutos visualmente não ocasionavam ressuspensão dos que já estavam sedimentados. Nas situações em que ocorreu obstrução parcial da seção dos dutos, o próprio fluxo de água ocasionava certa ressuspensão dos flocos, porém, em escala muito pequena, inclusive não sendo o suficiente para ir dissipando tal obstrução.

5.5.1.7 Critério 8 – Facilidade de deslizamento dos flocos

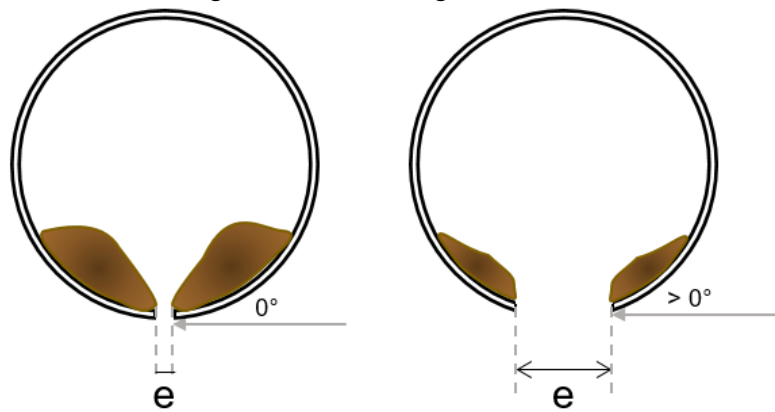
A inclinação inerente ao formato losangular da seção dos dutos facilitou o deslizamento da maior parte dos sólidos para saírem através da abertura inferior. Observou-se, ao longo da operação dos dutos 4 e 5, que inicialmente os flocos iam sedimentando nas paredes inclinadas do fundo do duto e, aos poucos, outros flocos iam se aglutinando. À medida que o aglomerado de flocos ganhava volume, o peso ia aumentando, até certo ponto em que essa força vencida a força do atrito estático e do empuxo para sedimentar através da abertura inferior.

Nos dutos circulares, onde o ângulo perto da abertura é próximo a 0° , não se é favorável para direcionar os flocos à abertura longitudinal inferior. Com um ângulo nulo em relação à horizontal, o atrito estático é máximo, promovendo a estagnação da partícula nessa região.

A partir dessa problemática, percebeu-se que a largura da abertura inferior dos dutos parece ser mais decisiva para autolimpeza do formato circular do que losangular. Quanto maior a largura da abertura, menor a região com ângulo próximo a 0° (Figura 91).

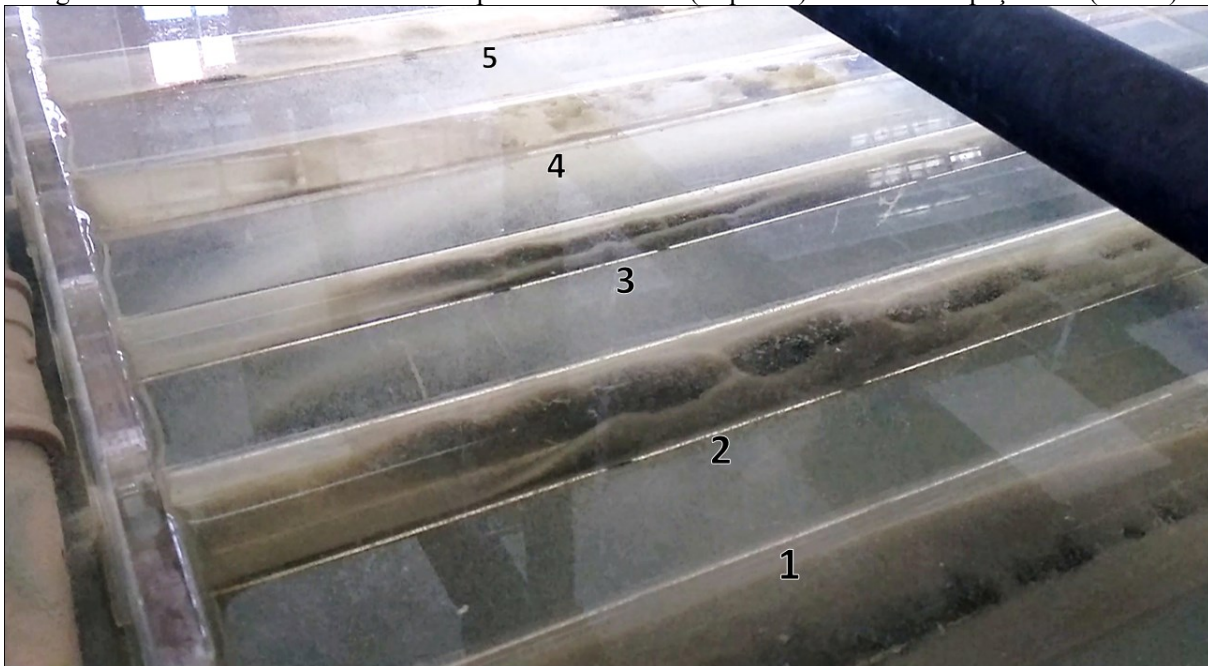
O tamanho da seção nos dutos circulares, portanto, teve influência indireta na facilidade de deslizamento dos flocos, devido à proporção entre os tamanhos da seção e abertura longitudinal inferior.

Figura 91 – Influência da largura da abertura longitudinal inferior no acúmulo de lodo.



Na Figura 92 é possível perceber que os dutos circulares (1, 2 e 3), por não apresentarem ângulo propício para os flocos escoarem, acumulam quantidade significativa de lodo em seu interior, obstruindo parte da seção. Já os dutos losangulares (4 e 5) apresentam a passagem livre, tanto passagem para os sólidos serem removidos pela abertura, quanto passagem para o fluxo de água clarificado seguir até a zona de saída sem obstáculos.

Figura 92 – Duto com abertura inferior próximo de fechar (esquerda) e duto com espaçadores (direita).



A distância vertical da seção transversal dos dutos losangulares aparentemente não influenciou na facilidade de deslizamento dos flocos, pois o ângulo de inclinação das paredes foi o mesmo entre ambos. Desse modo, o ângulo de inclinação da base do duto é o fator essencial para a autolimpeza quanto a este critério. Pode-se dizer que esta ocorreu com eficiência para dutos de formato losangular.

5.5.1.8 Critério 9 – Relação entre tamanhos da seção e da abertura inferior

Os resultados referentes ao cálculo da razão entre o tamanho da seção e a largura da abertura longitudinal inferior respectivamente, estão expressos na Tabela 29. O tamanho da seção considerado foi tanto a distância horizontal, como vertical.

Tabela 29 – Relação entre tamanho dos dutos do Decantador 1 e larguras das respectiva aberturas inferiores.

Duto	Diâmetro (d), ou Diagonal vertical (dv) ou horizontal (dh) (mm)	Largura da abertura inferior e (mm)	$R =$ dh/e_a	Área da abertura longitudinal inferior (A_a) (cm ² /m)	Área da seção transversal do duto (A_d) (cm ²)	$R_a = A_a/A_d$ (m ⁻¹)
1	54	3,4	15,9	34	22,9	1,5
2	34	3,4	10,0	34	9,1	3,7
3	21	2,2	9,6	22	3,5	6,4
4	39	3,4	11,5	34	7,6	4,5
5	35	3,0	11,7	30	6,2	4,8

Observando a Tabela 29, repara-se que a relação R correspondente ao Duto 1 destoou quando comparada às demais, sendo 25 a 37% maior. Dado o pior desempenho na autolimpeza do Duto 1 nas outras etapas, isso provavelmente significa que a largura da abertura longitudinal inferior desse duto foi ínfima demais para seu diâmetro. O que resultou em maior acúmulo de lodo nas laterais próximas à abertura longitudinal inferior e pior autolimpeza de um modo geral.

O Duto 1 também foi o que apresentou menor relação R_a , indicando uma área da abertura longitudinal inferior proporcionalmente pequena para permitir a saída de flocos.

As relações R dos dutos 2 e 3 foram semelhantes entre si, assim como a relação dos dutos 4 e 5. A relação R_a também foi muito similar entre os dutos losangulares. Todavia, foi bem diferente entre os dutos circulares, sendo o Duto 3 com maior relação R_a , sendo provavelmente favorecido por isso.

Comparando os dutos 2 e 5, de diferentes formatos e igual distância vertical da seção transversal, notou-se que o Duto 5 apresenta uma R_a maior. Isso pode indicar uma vantagem no Duto 5 em relação ao 2, com abertura proporcionalmente maior para a saída de flocos.

Outra observação foi que, devido ao fato de o Duto 2 apresentar maior área da seção transversal do que o Duto 5 (para mesma altura da seção), o primeiro transporta maior vazão, visto que possui mesma velocidade de escoamento longitudinal que o segundo. Assim, uma vazão maior consequentemente significa mais sólidos em suspensão no Duto 2, necessitando

ter maior largura da abertura longitudinal inferior para permitir a passagem dos flocos com mesma relação de área (Ra) que o Duto 5.

As relações demonstradas podem ter sido um influente externo na pesquisa, porém que não pôde ser evitado devido as limitações construtivas em acrílico. Para pesquisas futuras sugere-se um estudo mais aprofundado da influência desta relação na capacidade de autolimpeza, se há uma relação ótima, máxima ou mínima para R e Ra .

5.5.1.9 Critério 10 – Regime de escoamento

Os resultados do n° de Reynolds para os dutos do Decantador 1 estão dispostos na Tabela 30, para uma viscosidade cinemática da água igual a $9,902 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (temperatura média da água igual a $20,9^\circ\text{C}$) e velocidade de escoamento longitudinal de $38,5 \text{ cm}/\text{min}$.

Tabela 30 – Número de Reynolds nos dutos do decantador 1, bem como o perímetro e raio hidráulico, referentes a cálculos intermediários.

Duto	Perímetro (cm)	Raio hidráulico (cm)	Número de Reynolds (adim.)
○ 1	17,0	1,35	350
○ 2	10,7	0,85	220
◦ 3	6,6	0,53	136
◇ 4	11,2	0,68	176
◇ 5	10,4	0,60	155

Segundo Arboleda (2000), o decantador laminar geralmente apresenta número de Reynolds (N_R) menor que 500. Willis (1978) propôs que um número de Reynolds igual ou inferior a 400 deveria ser considerado no projeto de decantadores tubulares.

Para que o fluxo possa ser em regime laminar, AWWA (2002) sugere que o N_R preferencialmente deva ser menor que 280, quando a sedimentação for de partículas floculentas em decantadores de placas paralelas. Azevedo Netto, no livro da CETESB (1976), afirmou que a tendência desses decantadores é alcançar um N_R menor do que 250. Contudo, o fluxo da água já é considerado em regime laminar com N_R abaixo de 2000 (AZEVEDO NETTO e ALVAREZ, 1985).

O maior N_R alcançado neste decantador foi igual a 350, referente ao Duto 1, portanto o fluxo da zona de sedimentação pode ser considerado laminar, como proposto. O único N_R que ultrapassou algum dos valores citados como comuns na literatura foi o Duto 1, maior do que 250, indicado na CETESB (1976). Mesmo assim, embora visualmente mais turbulento nos primeiros centímetros adentrando no Duto 1 durante a Etapa 2, este e os demais dutos apresentaram escoamento aparentemente laminar.

Os dutos de sedimentação propiciaram regime de fluxo laminar na região de escoamento plenamente desenvolvido, ideal para sedimentação dos flocos. Apenas no trecho de transição entre a entrada dos dutos até se estabelecer um escoamento plenamente desenvolvido, que foi observada visualmente uma turbulência. Tal turbulência nessa região é relatada em alguns trabalhos anteriores, como de Soares, Schulz, Roma e Di Bernardo (1997) e Alcócer e Di Bernardo (2001).

5.5.1.10 Considerações sobre a capacidade de autolimpeza

Considerou-se que, dentre os dutos horizontais com abertura longitudinal inferior testados, os dutos com seção transversal de formato losangular foram os que apresentaram uma autolimpeza eficaz, independente do tamanho.

Os dutos circulares podem ter seu mecanismo de autolimpeza melhorado ainda, por exemplo, com um estudo da largura ótima da abertura longitudinal inferior. Estima-se que se os dutos circulares (iguais aos utilizados neste estudo) fossem utilizados em um tratamento contínuo 24h/d, em algum momento, haveria a necessidade de parada da unidade para desobstrução da seção. O que provavelmente não ocorreria com os dutos losangulares, de acordo com as observações realizadas.

Como ilustração geral da eficiência de autolimpeza dos dutos horizontais, que caracteriza a inovação deste trabalho, apresenta-se na Figura 93, a característica da água na entrada e saída de um duto de sedimentação.

Figura 93 – Entrada e saída de um duto horizontal de sedimentação do tipo *MLSens*.



5.5.2 Distância Máxima Alcançada pelos Flocos nos Dutos

O alcance máximo de lodo notado no interior dos dutos permitiu recalcular a taxa de escoamento superficial (Equação 9) passível de ser aplicada em cada elemento de sedimentação. Na Tabela 31, estão expressos a vazão individual, a área superficial do duto

vista de cima, considerando o alcance de lodo médio observado em cada duto, e a taxa individual possível, resultante para Etapa 1.

Tabela 31 – Taxa de escoamento superficial possível a partir do alcance de lodo nos dutos na Etapa 1.

Duto	Diâmetro / diagonal horizontal (m)	Alcance do lodo (m)	Área superficial (m ²)	Vazão do duto (m ³ /d)	Taxa de escoamento superficial possível (m ³ /m ² .d)
1	0,054	0,800	0,043	1,27	29,4
2	0,034	0,488	0,017	0,50	30,3
3	0,021	0,443	0,009	0,19	20,6
4	0,040	0,485	0,019	0,42	22,0
5	0,036	0,484	0,017	0,34	19,8

Ao analisar a Tabela 31, pode-se notar que o alcance de lodo para o duto circular 2 e os dutos losangulares 4 e 5 foram similares. A semelhança entre o alcance dos dutos 2 e 5 é justificada pela mesma distância vertical necessária a ser percorrida pelo floco que entra na posição crítica. Todavia, teoricamente, o Duto 4 deveria apresentar um alcance maior que os dutos citados anteriormente, visto que possui maior altura vertical. Pode-se ainda salientar que a diferença de altura entre esses dutos é pequena (4 mm).

Outro fator a ser citado, foi a dificuldade em determinar o alcance exato nos dutos losangulares, pois o acúmulo de lodo ocorria de modo esparsos, em pequenos aglomerados.

Observando os dutos 1 e 3, obteve-se o maior e menor alcance de lodo, devido ao maior e menor diâmetro da seção transversal, respectivamente. Comparando com as eficiências de remoção de sólidos obtidas nos dutos, nota-se que a distância de lodo é inversamente proporcional à eficiência. O Duto 3 apresentou uma eficiência média estatisticamente maior que o Duto 1, e exibiu menor distância de lodo.

Em todos os dutos seria possível aumentar a taxa de escoamento superficial, ou seja, o decantador poderia trabalhar com uma vazão maior, explorando ainda mais o comprimento disponível para sedimentação.

As distâncias alcançadas de lodo no interior dos dutos permitiram a verificação em cada um se a maioria dos flocos sedimenta pela abertura longitudinal inferior antes de atingir a zona de saída do decantador.

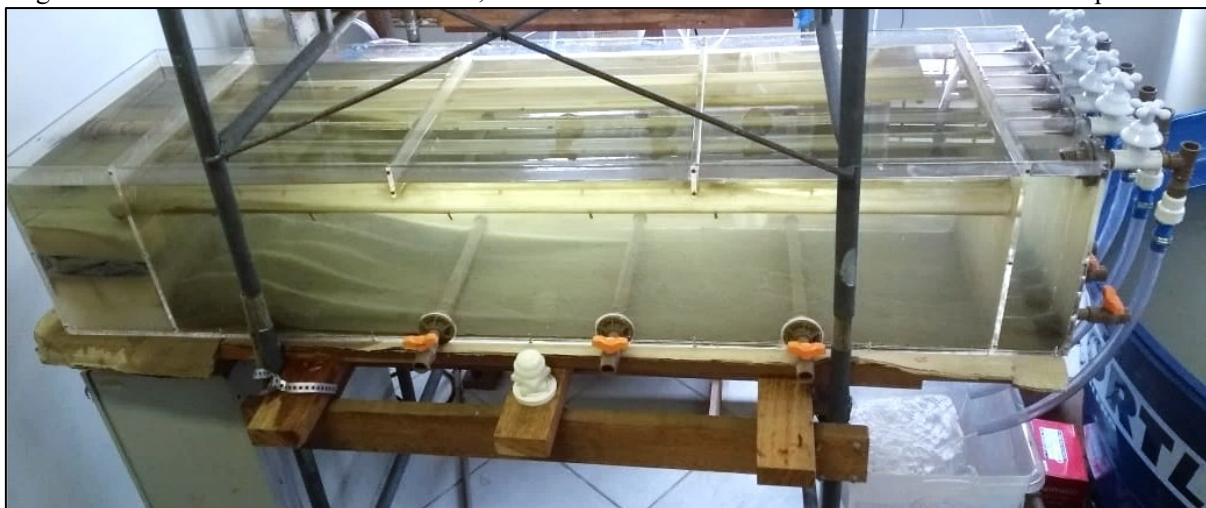
Também pode se observar este alcance dos flocos na zona de lodo, na Figura 94, onde se identificou acúmulos referentes a cada duto, devido aos flocos sedimentarem em linha reta para o fundo do decantador, sem sofrer interferência de turbulências ou correntes de fluxo.

Figura 94 – Zona de lodo do Decantador 1, salientando o monte formado abaixo de cada duto.



No Decantador 1, após a operação da Etapa 1 e 2, verificou-se que a maioria dos flocos sedimentou no primeiro um terço do comprimento total da zona de sedimentação, como pode se observar na Figura 95. Esse fato demonstra que o decantador funcionou adequadamente.

Figura 95 – Vista lateral do Decantador 1, com o acúmulo de lodo concentrado no início do comprimento.



Em um decantador convencional de fluxo horizontal, a sedimentação no primeiro terço do comprimento é normal, quando se tem uma boa floculação. Diferentemente destes decantadores, na concepção apresentada neste estudo, os flocos podem ser depositados ao longo de toda a área de sedimentação, como nos decantadores de alta taxa.

A sedimentação dos flocos em toda a área é possível também na nova concepção da conformação interna, pois não há o risco de ressuspensão dos flocos após a passagem pelas

aberturas longitudinais inferiores. Como o lodo sedimentado teve um alcance no comprimento menor que o disponível, a taxa de escoamento superficial poderia ser aumentada.

Observando os resultados promissores no funcionamento do Decantador 1, estima-se que, comparando o decantador do presente trabalho com os de alta taxa, haverá menor possibilidade de carreamento dos flocos mais leves para a zona de saída, o que em qualquer um deles pode acontecer, mas, no caso deste estudo, a possibilidade deve ser menor.

A decisão em aumentar ou não a taxa de escoamento superficial é mais visível e imediata neste tipo de decantador tubular horizontal, quando comparado ao de alta taxa. Neste caso, também diminui a necessidade de realizar ensaios de tratabilidade para saber sobre a taxa.

5.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1)

5.6.1 Análise Estatística Descritiva

5.6.1.1 Análise descritiva geral

Para uma avaliação geral dos resultados referentes ao Decantador 2, elaborou-se a Tabela 32, contendo os dados descritivos dos parâmetros medidos.

Tabela 32 – Análise descritiva dos parâmetros observados na Fase II, Etapa 1.

Parâmetro	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	
Taxa escoamento superficial decantador (m ³ /m ² .d)	14,1 ± 0,2	14,0	11,2	17,5	0,9 ± 0,1	
Velocidade longitudinal no duto (cm/min)	19,8 ± 0,3	19,7	15,7	24,6	1,3 ± 0,2	
Vazão total do sistema (L/min)	1,88 ± 0,03	1,86	1,48	2,46	0,12 ± 0,02	
Turbidez (uT)	Água bruta	119,1 ± 1,2	119,0	111,0	132,0	6,2 ± 1,0
	Água floculada	38,7 ± 2,2	37,3	14,6	68,3	11,1 ± 1,8
	Água decantada	1,71 ± 0,11	1,62	0,86	3,75	0,53 ± 0,09
Eficiência remoção de turbidez (%)	Decantador	95,2 ± 0,4	95,7	87,6	98,3	1,9 ± 0,3
	Sistema	98,6 ± 0,1	98,6	97,2	99,3	0,4 ± 0,1
Cor aparente (uH)	Água bruta	1465 ± 20	1445	1295	1637	102 ± 192
	Água floculada	348 ± 20	336	142	680	100 ± 16
	Água decantada	26 ± 1	24	16	52	6 ± 1
Eficiência remoção de cor aparente (%)	Decantador	92,1 ± 0,6	92,4	80,8	96,9	2,9 ± 0,5
	Sistema	98,2 ± 0,1	98,3	96,5	99,0	0,4 ± 0,1

Da mesma forma que na Etapa 1 do Decantador 1, buscou-se manter a vazão, e a velocidade longitudinal constantes, nesse caso, a fim de simular as mesmas condições ao longo do experimento. Após as medições dos dados, verificou-se que o desvio padrão em relação à média para ambas as variáveis, e conseqüentemente para a taxa, foi de apenas 6,4%, denotando uma pequena variação.

De modo análogo, como condição inicial, também tentou-se manter a água bruta com turbidez constante. Observando os dados, a variação foi de 5,2% em relação à média amostral, o que indica que esse parâmetro não oscilou significativamente.

Em contrapartida, a turbidez média da água floculada (referente às amostras compostas da entrada em cada um dos nove dutos do arranjo) registrou um desvio padrão de 28,7% referente à média amostral. Isso se deu possivelmente pelas diferentes condições temporais ao longo do experimento.

O desvio padrão da turbidez da água floculada refletiu em uma maior variabilidade para a turbidez da água decantada, a qual variou 31,0% em relação à média amostral. O Decantador 2 apresentou um efluente com turbidez média igual a $1,71 \pm 0,12$ uT.

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017), a turbidez da água decantada não deve ser superior a 5 uT para que os filtros funcionem satisfatoriamente (com turbidez menor que 0,5 uT e carreira de filtração com duração razoável). Já Richter (2009) cita o exemplo de uma reforma na ETA de Toledo, relatando que a água decantada passou de 7,1 uT para 5,6 uT após as mudanças realizadas, e que valores dessa ordem de turbidez são facilmente absorvidos por filtros.

Em relação à eficácia no tratamento de água para abastecimento, o autor do presente trabalho recomenda obter uma turbidez da água decantada abaixo de 2 uT, considerada de boa qualidade com o intuito de alcançar uma carreira de filtração adequada (>24 h) na maior parte do tempo.

A partir desses valores citados na literatura, a turbidez da água decantada nas Fases I e II deste estudo representam uma excelente qualidade efluente para ser direcionado aos processos posteriores de tratamento.

Segundo Richter (2009), os decantadores são responsáveis por removerem cerca de 95% dos sólidos suspensos, restando aos filtros 5%.

Em geral, a eficiência de remoção de turbidez no Decantador 2, com uma média de $95,2\% \pm 0,4\%$, foi considerada adequada de acordo com a literatura. Observando esse parâmetro, mesmo com afluentes com qualidade de água bem variável, o desvio padrão em

relação a média foi de apenas 2,1%, mantendo constante uma eficiência elevada. Isso demonstra uma consistência e homogeneidade nas características do tratamento.

A eficiência de remoção de cor aparente também registrou valores satisfatórios, com $92,1\% \pm 0,7\%$. De forma análoga à turbidez, também variou pouco, com um desvio padrão em relação à média de 3,1%.

Assim como na discussão dos resultados de eficiência do Decantador 1, pode-se citar que decantadores de alta taxa de placas paralelas inclinadas experimentados nos trabalhos de Sharma e Bhatia (2018), Gurjar e colaboradores (2017), Tarpagkou e Pantokratoras (2014), e Clark e colaboradores (2009), obtiveram eficiências de remoção menores que o Decantador 2.

Quanto aos parâmetros complementares, as temperaturas médias da água bruta e decantada, no Decantador 2, foram 24,7 e 24,3°C, respectivamente. O desvio padrão em relação à média da temperatura da água decantada foi de apenas 3%, uma variação pequena.

No Decantador 2, o pH médio da água bruta e decantada foi de 6,27 e 5,79, respectivamente. Da mesma forma que para a temperatura, o desvio padrão em relação à média amostral do pH da água decantada foi muito pequeno, igual a 2,6%. A diminuição do pH foi decorrente da aplicação do coagulante, porém, foi considerada pequena, a ponto de não necessitar da aplicação de alcalinizante, confirmando o ponto positivo de se utilizar PAC.

5.6.1.2 Variabilidade temporal

Primeiramente, se observou o comportamento dos valores de turbidez e cor aparente da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo, demonstrado na Figura 96 e na Figura 97.

Figura 96 – Diagrama de dispersão da turbidez da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo.

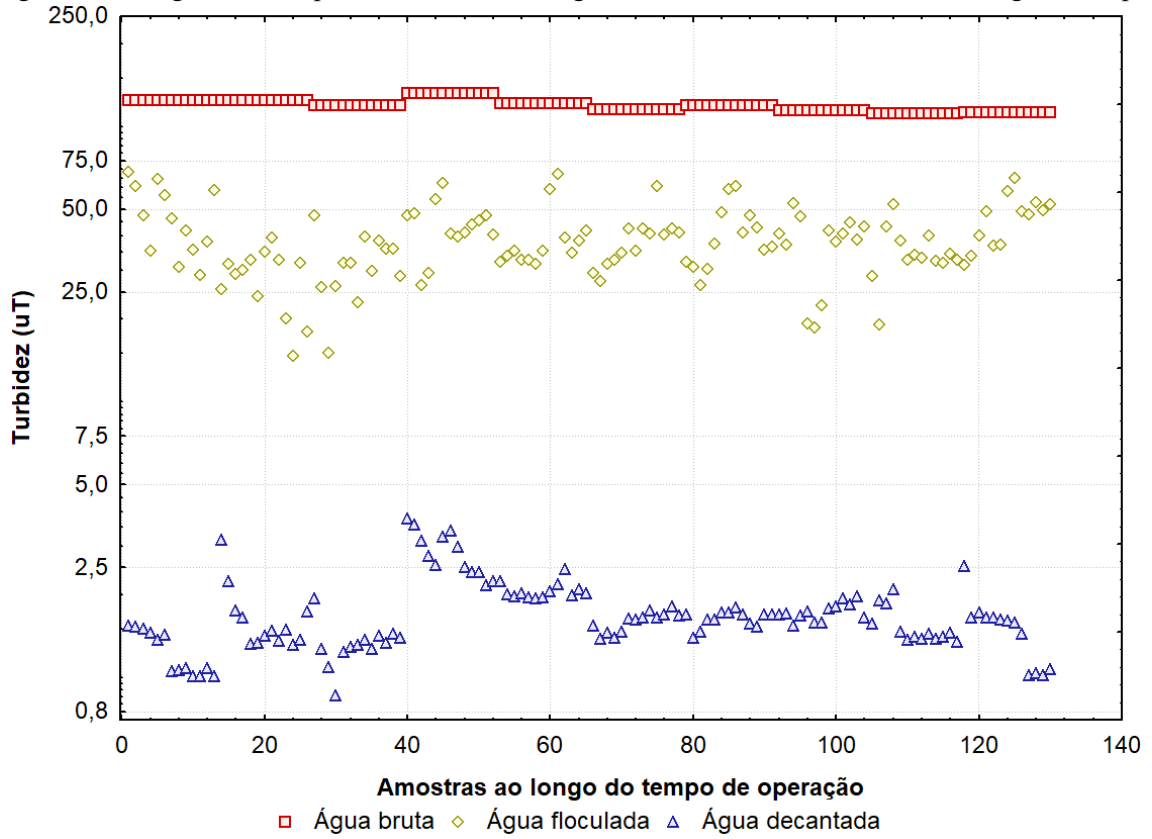
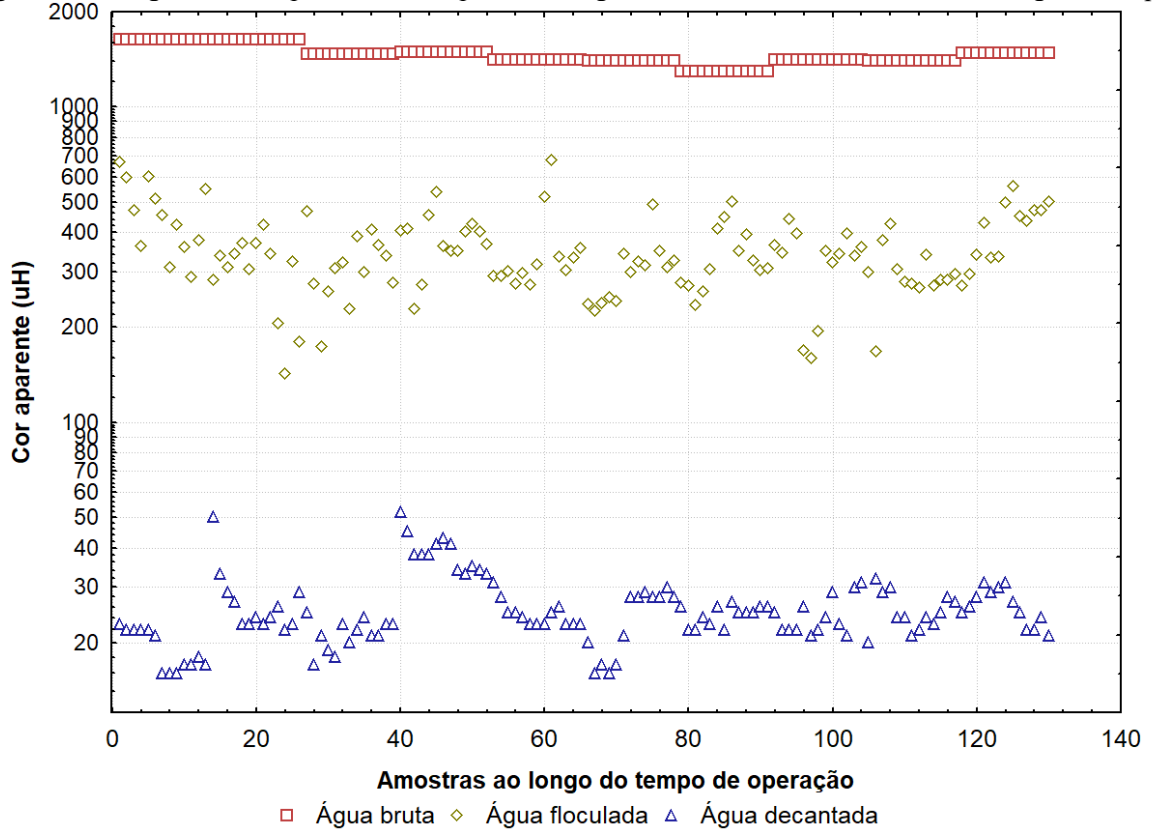


Figura 97 – Diagrama de dispersão da cor aparente da água bruta, floculada e decantada ao longo do tempo.

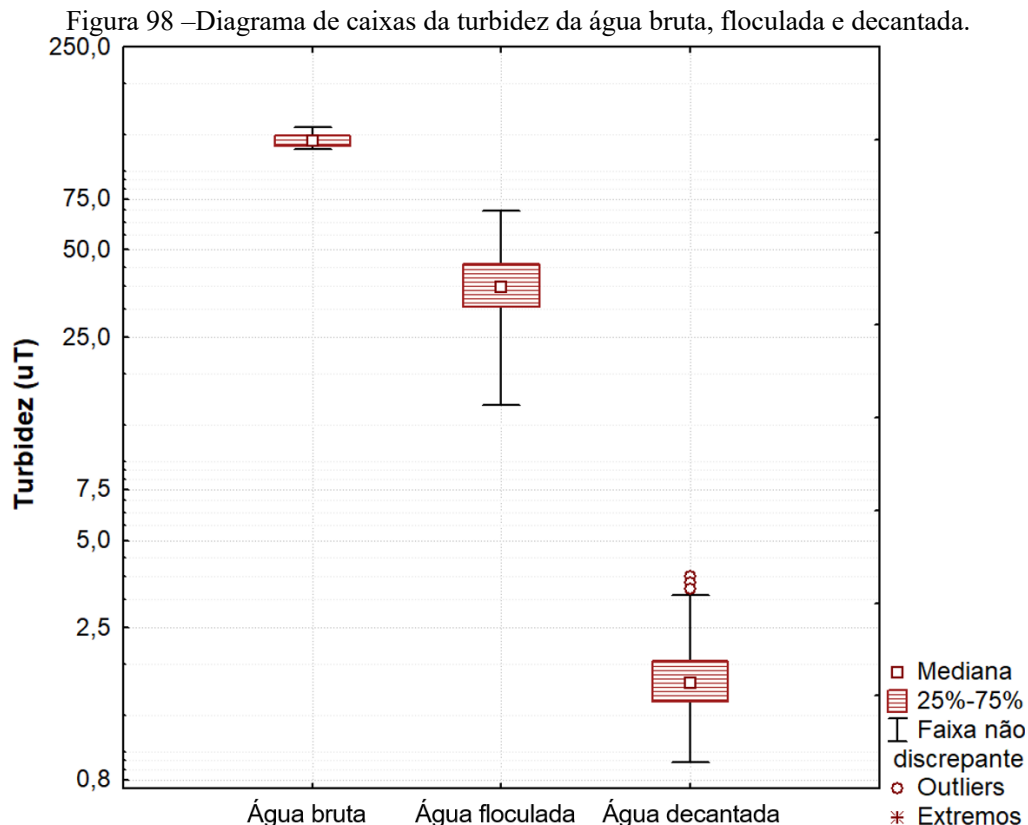


Como foram 10 operações com 13 amostras em cada, identificam-se os períodos de cada operação por valores múltiplos de 13. Ambos os diagramas de dispersão foram representados em escala logarítmica devido à distribuição lognormal dos dados de água decantada.

Observa-se que a turbidez da água decantada ficou 100% do tempo menor do que 4 uT (Figura 96), dentro do recomendado por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017). No início da segunda e da quarta operação, ocorreram valores elevados de turbidez e cor aparente na água decantada, sem haver, necessariamente, uma água floculada com este parâmetro elevado. Com exceção do início dessas operações, houve pouca variabilidade nos dados relacionados à água decantada.

A turbidez da água floculada variou praticamente 20 e 70 uT e a água bruta se manteve próximo de 120 uT. Comenta-se ainda que nenhuma das faixas de turbidez se aproximou uma da outra, apresentando uma diferença aproximadamente constante entre os valores da água decantada e floculada. O comportamento da cor aparente (Figura 97) foi proporcional, com a água decantada geralmente abaixo de 50 uH, água floculada variando entre 200 e 700 uH e água bruta em cerca de 1500 uH.

Além do gráfico de dispersão também foi construído um diagrama de caixas com o intuito de observar melhor a variação e distribuição dos dados (Figura 98).

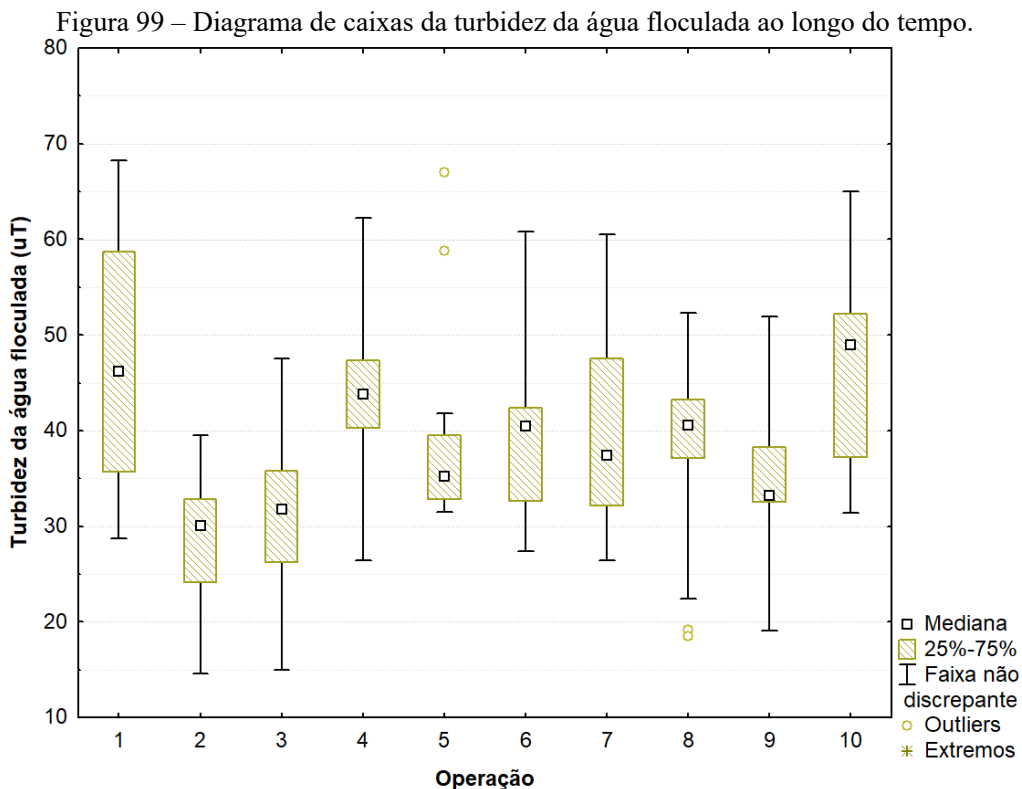


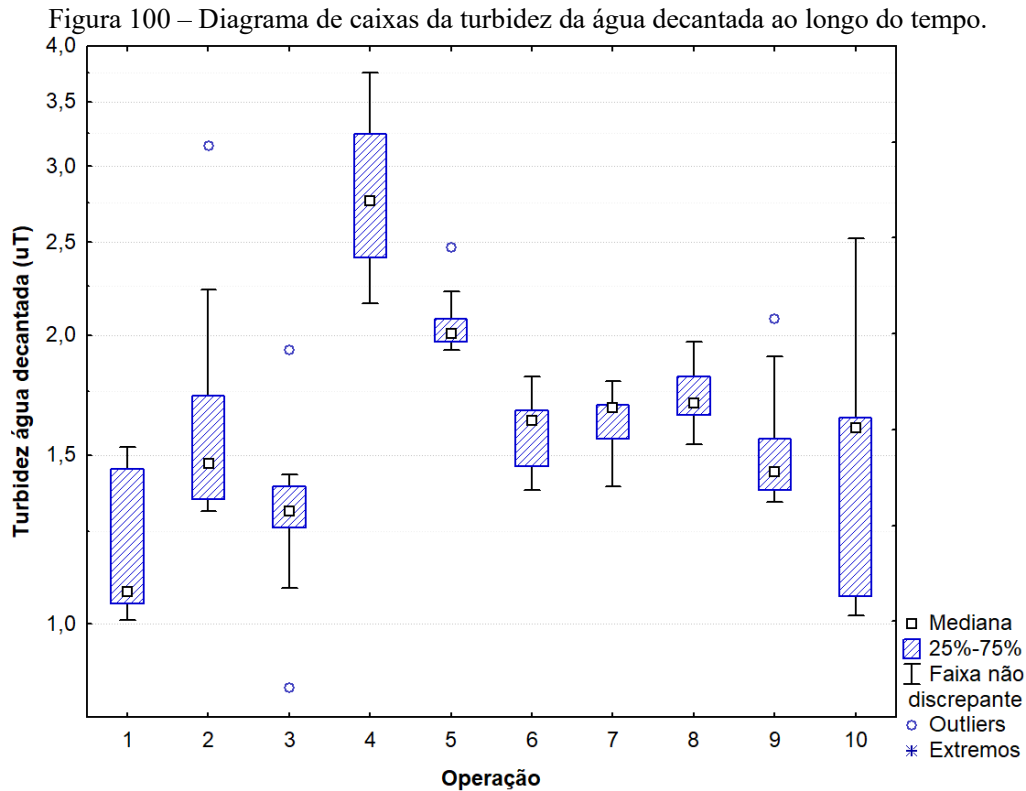
Fica evidente na Figura 98 a pequena variabilidade dos dados de turbidez da água decantada, cuja distribuição de dados apresentou 75% dos valores abaixo de 2,0 uT. O maior valor da distribuição se aproximou de 3,0 uT, sendo os três valores marcados como outliers entre 3,0 e 3,8 uT, de ocorrência improvável. Sendo assim, a turbidez referente ao efluente do Decantador 2 apresentou uma qualidade muito boa, demonstrando ser um tratamento eficaz, que provavelmente iria propiciar carreiras de filtração maiores que 24 h nos filtros.

A água floculada não assumiu valores tão elevados, quando comparados ao padrão da água bruta, significando haver sedimentação prévia à unidade de sedimentação, como já comentado. Metade dos valores se concentrou entre 30 e 40 uT, ficando abaixo do mínimo indicado para uso de decantadores (50 uT). Mesmo assim, a unidade de decantação removeu os sólidos com aparente eficiência.

Houve *outliers* apenas na água decantada, os quais foram considerados na análise geral, pois são dados decorrentes da variação inerente dos elementos da população.

Nas Figuras 99 e 100, pode-se visualizar melhor a variabilidade dos dados da turbidez da água decantada e floculada.



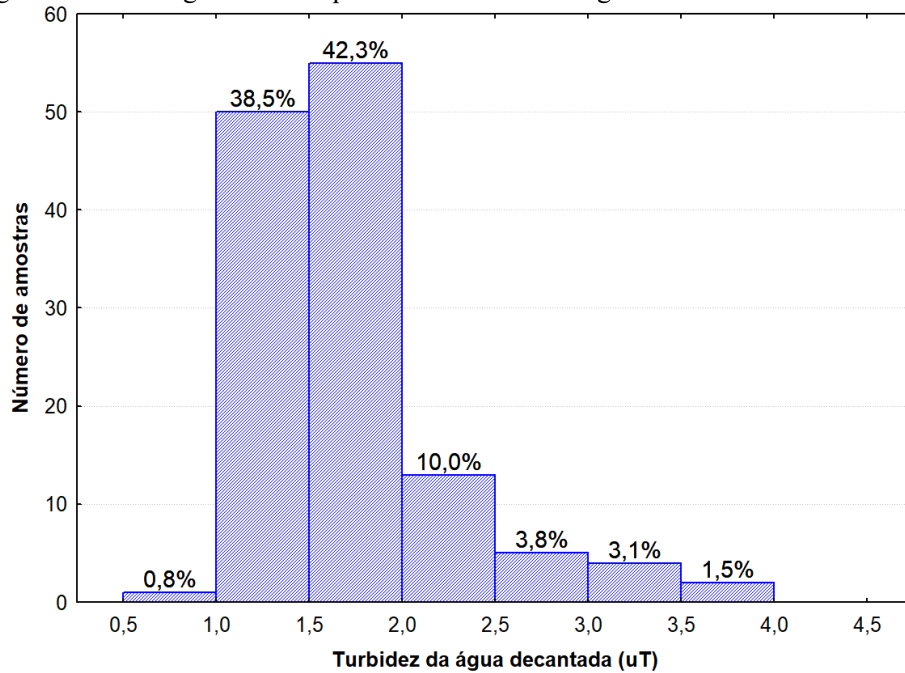


Comparando a dispersão dos dados da turbidez da água floculada e decantada, não foi notado um padrão que explique a variação entre uma operação e outra. Percebeu-se que uma variabilidade superior da qualidade da água floculada não necessariamente representou o mesmo para a água decantada. Por exemplo, na operação 1, a água afluente exibiu uma das maiores variabilidades, em contrapartida, os dados de turbidez ficaram entre 1,0 e 1,5 uT. Mesmo com variabilidade elevada na entrada do Decantador 2 nas operações 6 a 9, a água decantada resultou em valores menos variáveis, entre 1,4 e 1,8 uT, mantendo uma constância neste período.

Ainda observando os diagramas acima, destaca-se apenas a operação 4 que destoou das demais, pois mesmo com turbidez afluente em uma faixa elevada, principalmente entre 40 e 48 uT, apresentou 75% dos dados do efluente completamente acima da maioria dos resultados referentes às demais operações.

Com exceção da operação 4, que poderia ser considerada atípica em uma análise de inferência estatística, os valores da água decantada assumiram turbidez menor que 2,5 uT, uma qualidade boa para ser direcionada aos filtros. Isso pode ser melhor percebido no histograma de frequência da turbidez da água decantada do Decantador 2, mostrado na Figura 101.

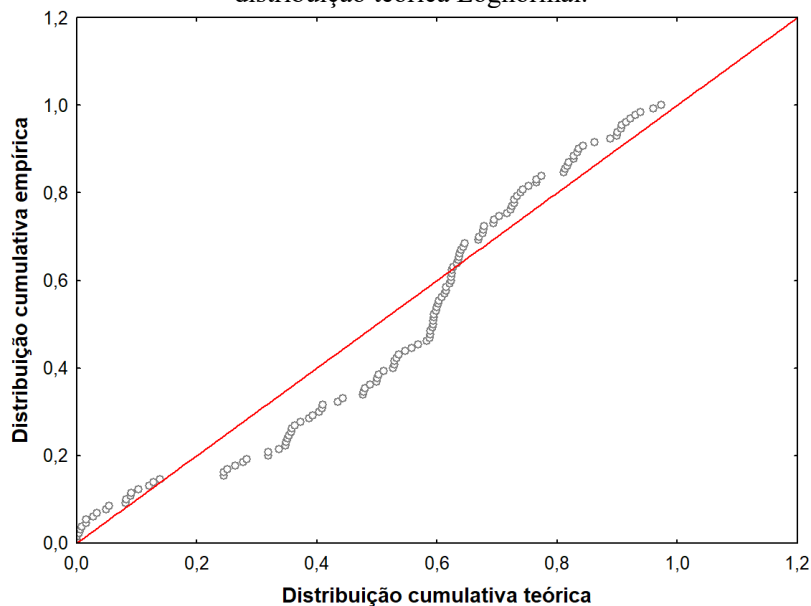
Figura 101 – Histograma de frequência da turbidez da água decantada do Decantador 2.



A partir do histograma da Figura 101, pode se dizer que em 91,6% do tempo, a água decantada apresentou turbidez menor do que 2,5 uT e 81,6% do tempo menor do que 2 uT, considerados resultados satisfatórios para saída de decantadores, como supracitado. Também se notou que houve uma frequência de 80,8% da turbidez entre 1,0 e 2,0 uT.

A distribuição dos dados referente à eficiência de remoção de turbidez não apresentou uma tendência típica de dados ambientais (normal ou lognormal), como mostra a Figura 102. Vale-se ressaltar que nenhuma transformação testada nos dados foi capaz de normalizá-los.

Figura 102 – Distribuição dos dados de eficiência de remoção de turbidez em relação à curva de distribuição teórica Lognormal.



Para avaliar a variabilidade temporal da eficiência de remoção de turbidez e cor aparente no Decantador 2, foram construídos gráficos de dispersão e diagramas de caixas em relação ao número de amostras e de operações, presentes nas Figura 103 a Figura 106.

Figura 103 – Diagrama de dispersão da eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo.

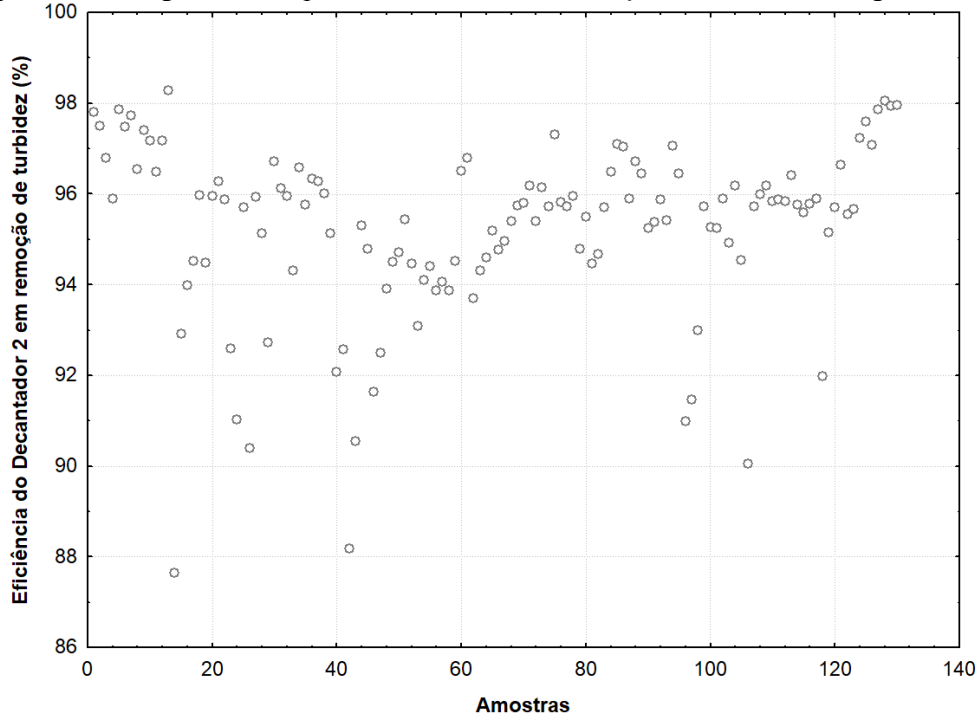
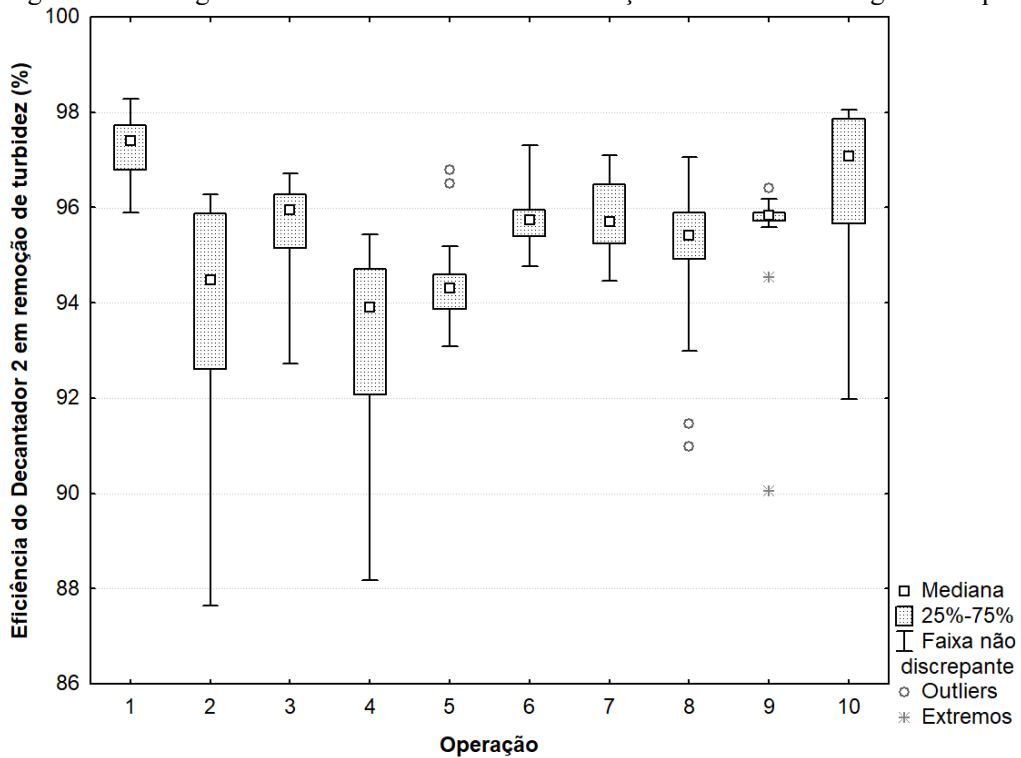


Figura 104 – Diagrama de caixas da eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo.



Sobre os diagramas de dispersão da eficiência de remoção de turbidez, observa-se uma variabilidade maior nos dias de operação 2, 4 e 10. Não se observou valores atípicos da temperatura e pH que justificassem esse comportamento. Talvez o recebimento de um novo lote de coagulante PAC após a operação 4 tenha influenciado, visto que a eficiência ficou mais regular e elevada após a quinta operação (com exceção da variabilidade da 10ª operação).

Destaca-se, a partir da quinta operação, que apenas cinco valores destoaram dos demais, sendo que dois deles foram considerados *outliers* (na 8ª operação) e outros dois, extremos (na 9ª operação). Esses dados não foram retirados, pois não foram realizados testes de inferência estatística com os mesmos.

Ainda se observa no diagrama acima, que a maioria das medianas apresentaram eficiência de remoção de turbidez entre 94 e 98%.

Figura 105 – Diagrama de dispersão da eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo.

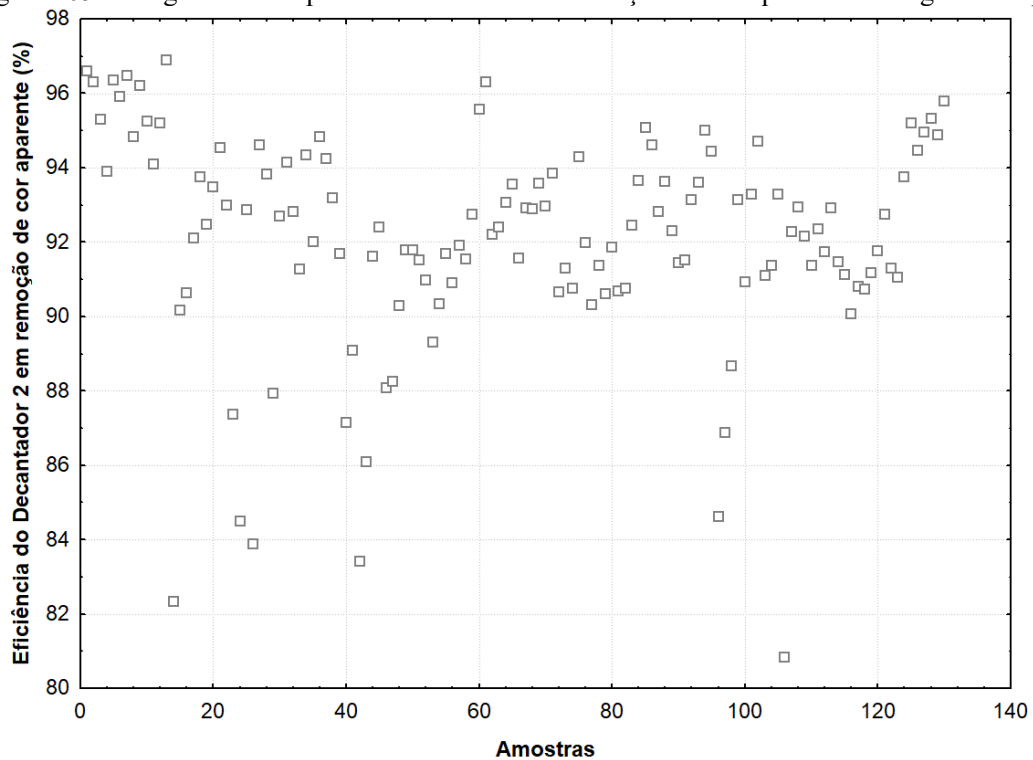
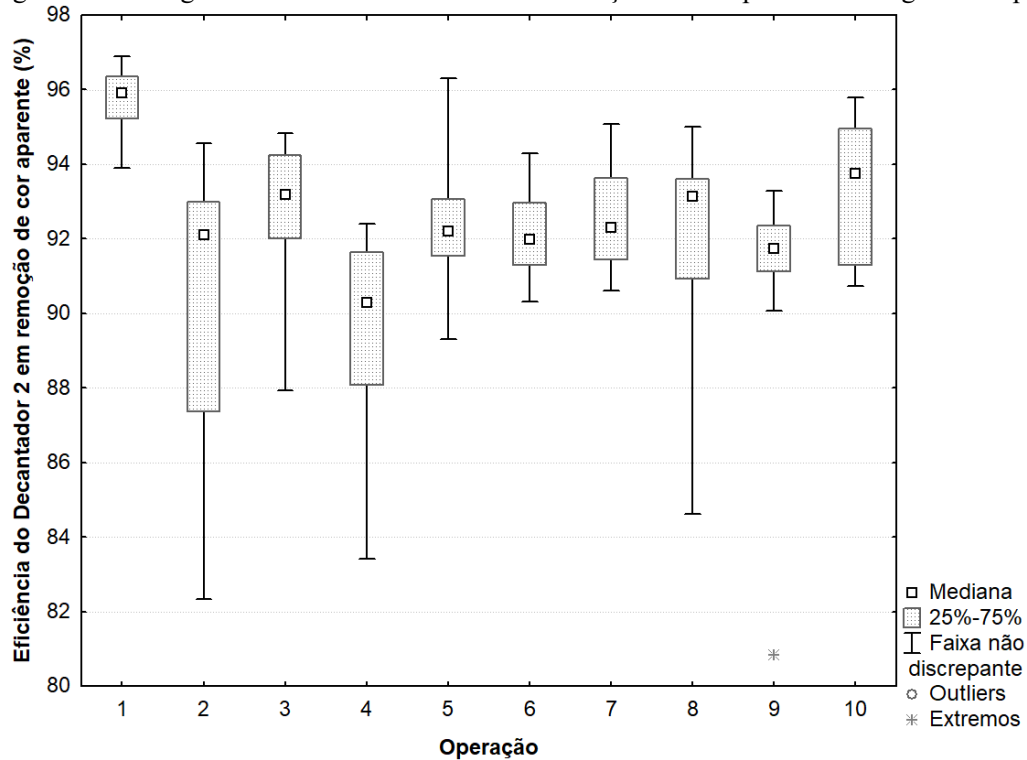


Figura 106 – Diagrama de caixas da eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo.



Como pode ser observado a partir dos diagramas da eficiência de remoção de cor aparente (Figura 105 e Figura 106), a variabilidade dos dados foi maior nas primeiras operações. Somente a partir da quinta, que houve uma maior estabilidade das eficiências, apresentando medianas entre 92% e 94% de remoção. Também, percebe-se que houve apenas um valor extremo, e nenhum *outlier*.

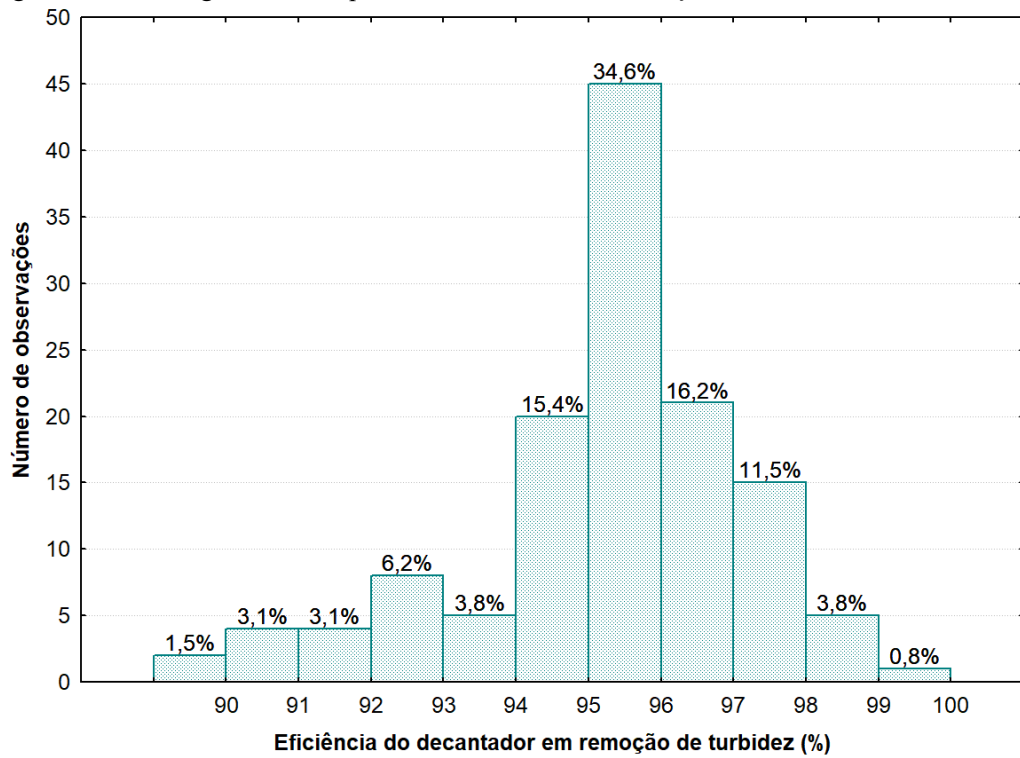
Hansen e Culp (1967), em seu experimento testando diferentes diâmetros e comprimentos de tubos de sedimentação posicionados na horizontal, obtiveram uma eficiência de remoção de turbidez entre 80% e 97%, considerando todos os dutos, sem adição de polieletrólitos, ou seja, o Decantador 2

Mesmo com valores não tão elevados de água floculada, o Decantador 2 apresentou bons resultados (com remoção média de 95,2% de turbidez e 92,1% de cor aparente). Provavelmente, se recebesse afluente com maior concentração de sólidos, apresentaria maiores valores de eficiência,

5.6.1.3 Análise da distribuição dos dados

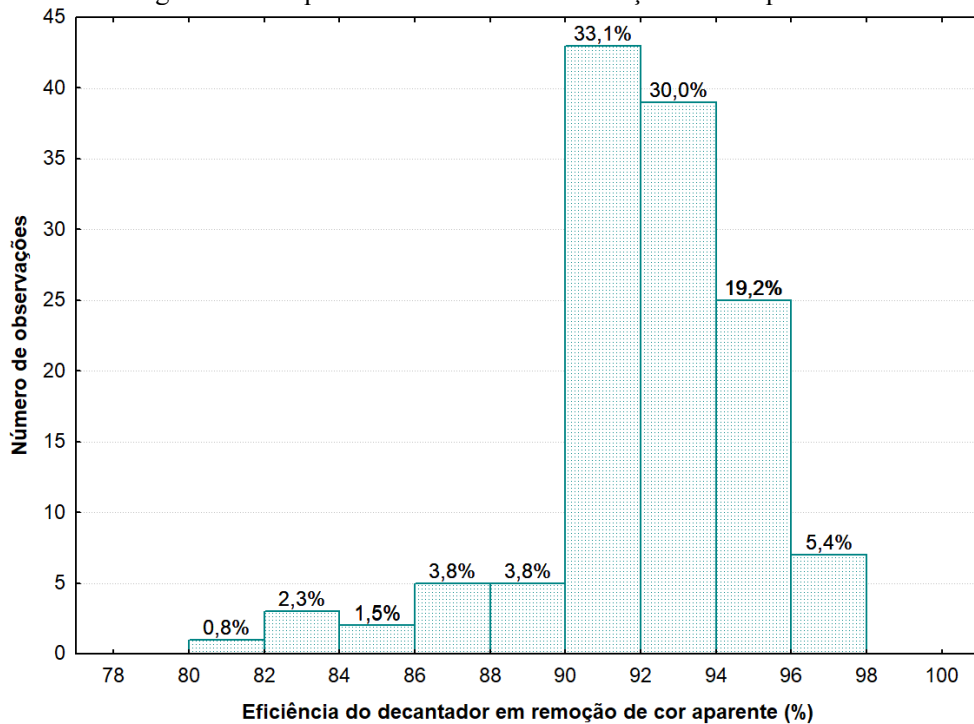
Nas Figuras 107 e 108 constam os histogramas de frequência referentes à eficiência de remoção de turbidez e cor aparente no Decantador 2.

Figura 107 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de turbidez do Decantador 2.



Como pode ser observado no histograma da Figura 107, em 98,5% do tempo, a eficiência de remoção de turbidez foi maior do que 90%. Também se apresentou, com uma frequência de cerca de 67%, dados superiores à 95% de eficiência. Ainda pode-se dizer que a maioria dos dados (77,7%) se concentrou entre 94 e 98%, como relatado no item anterior.

Figura 108 – Histograma de frequência da eficiência de remoção de cor aparente do Decantador 2.



No caso da remoção de cor aparente, em 88% do tempo, os dados assumiram valores maiores que 90% de eficiência.

5.7 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE AUTOLIMPEZA DE UM ARRANJO DE DUTOS (FASE II – ETAPA 1 E 2)

5.7.1 Análise dos Critérios de Autolimpeza

Neste tópico, foi avaliada a capacidade de autolimpeza dos nove dutos horizontais com abertura longitudinal inferior. A seguir, descreveu-se o comportamento das partículas floculentas a partir dos critérios de avaliação observados nas Etapas 1 e 2.

5.7.1.1 Critérios 1 e 2 – Retorno de flocos pela abertura longitudinal inferior

Para a situação do Decantador 2, teria uma chance maior de ocorrer o retorno de flocos no arranjo de dutos, devido ao fato de haver dutos em um nível abaixo do outro. Entretanto, aparentemente, os flocos que saíam através da abertura longitudinal inferior não retornavam mais para o mesmo duto (critério 1), bem como, não se movimentavam em direção ao interior dos outros dutos (critério 2). O movimento dos flocos era diretamente para o fundo do decantador, sem ser afetado por qualquer turbulência (Figura 109).

Figura 109 – Comportamento dos flocos ao saírem dos dutos do arranjo.

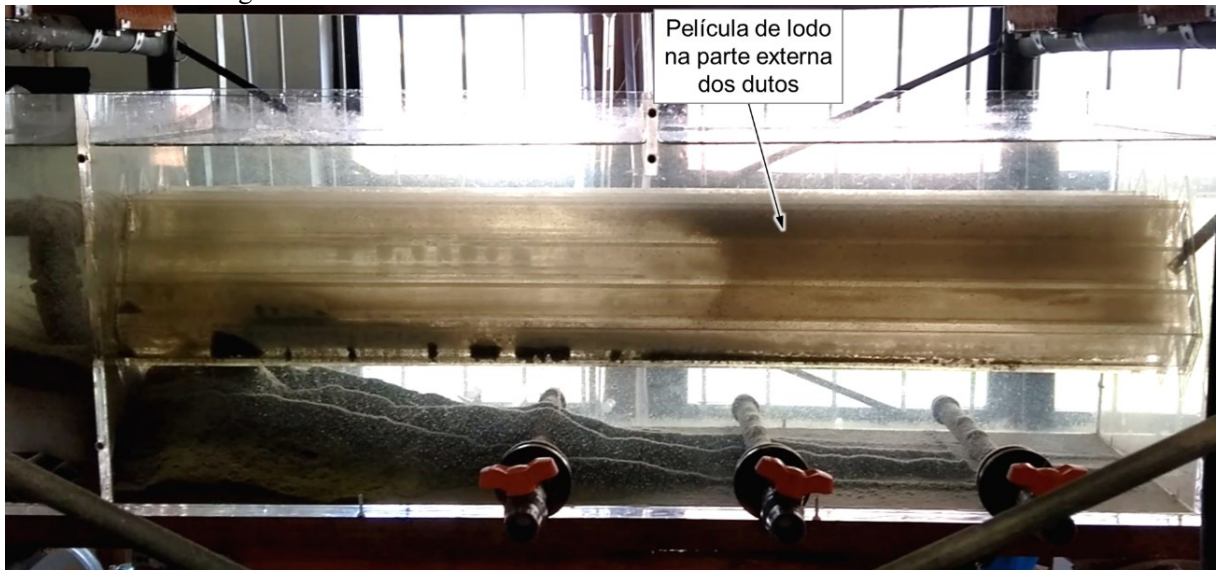


Na imagem da Figura 109, ficou nítida a distribuição mais acentuada da água floculada para os dutos intermediários e inferiores do arranjo. O ideal é que a distribuição fosse mais homogênea, porém como o objetivo não foi comparar os dutos entre si, considerou-se que esse fator não influenciou de modo significativo na eficiência final do decantador.

5.7.1.2 Critério 3 – Formação de camada de lodo revestindo a superfície externa dos dutos

Do mesmo modo que nos dutos do Decantador 1, não houve formação de camada significativa de lodo no perímetro interno dos dutos do Decantador 2, apenas fina camada na superfície externa dos dutos, onde a água estava estagnada (Figura 110).

Figura 110 – Camada de lodo fina externamente aos dutos horizontais.



5.7.1.3 Critério 4 – Acúmulo de lodo no fundo dos dutos

Como o formato da seção transversal dos dutos do arranjo foi losangular, o acúmulo de lodo praticamente não ocorreu, apenas de forma esparsa, com pequenos aglomerados ao longo do comprimento (Figura 111). O acúmulo que ocorreu, se deu principalmente nos dutos da camada inferior do arranjo (Figura 112), pois a mesma recebeu maior concentração de flocos, devido a não homogeneidade do dispositivo de distribuição de água floculada.

Figura 111 – Vista em planta do arranjo de dutos, com acúmulo de lodo em diferentes intervalos.



Figura 112 – Vista lateral do arranjo de dutos, com acúmulos pontuais no fundo dos dutos.



5.7.1.4 Critérios 5 e 6 – Obstrução da seção transversal e da abertura longitudinal inferior dos dutos

Em nenhum momento da Fase II houve obstrução completa da seção transversal dos dutos. O acúmulo de lodo no máximo obstruiu metade da seção, nas piores situações de operação (pior flocculação ou descarga maior de sólidos na Etapa 2). Nessas ocasiões, vale ressaltar que a abertura longitudinal inferior não ficava obstruída, pois não houve ligação entre o lodo acumulado em cada parede lateral do fundo do duto, isto é, o lodo saía pela abertura à medida em que aumenta o volume acumulado. Novamente, a ocorrência da obstrução parcial da seção, ocorreu nos dutos da camada inferior do arranjo (ver Figura 112).

5.7.1.5 Critério 7 – Ocorrência de ressuspensão de flocos

Aparentemente, não ocorreu ressuspensão dos flocos na maioria dos dutos e, se houve, foi em escala imperceptível a olho nu. Mesmo no trecho de transição da entrada dos dutos, onde havia uma pequena turbulência, não foi observado nada significativo. Dessa forma, visualmente, nem o fluxo da água, nem os flocos em trânsito no interior dos dutos, ocasionavam ressuspensão dos que já estavam sedimentados.

5.7.1.6 Critério 8 – Facilidade de deslizamento dos flocos

Como a lateral do duto losangular forma um ângulo de 60° com a horizontal, as paredes se afinam de modo íngreme em direção à abertura longitudinal inferior, propiciando o deslizamento dos flocos. Com o passar do tempo, os flocos que sedimentavam nas paredes

inclinadas do fundo do duto iam se aglutinando a novos flocos, ganhando volume e o peso, até superar as forças estáticas e de empuxo para deslizar.

Não se sabe ao certo o motivo de ainda haver acúmulo em alguns pontos mesmo apresentando ângulo inclinado na geometria da seção, mas suspeita-se de a origem dos pontos terem sido imperfeições no corte para realização da abertura longitudinal inferior. As saliências e rebarbas podem ser o ponto de partida para os flocos que possuem uma aderência considerável (devido ao coagulante), aparentemente, se aderirem na parede do duto.

5.7.1.7 Critério 9 – Relação entre tamanhos da seção e da abertura inferior

O resultado da razão entre o tamanho da seção e a largura da abertura longitudinal inferior respectivamente, está demonstrado na Tabela 33. O tamanho da seção considerado foi tanto a distância horizontal, como vertical.

Tabela 33 – Relação entre tamanho da seção dos dutos do Decantador 2 e largura da abertura inferior.

Duto	Diagonal vertical dv (mm)	Diagonal horizontal dh (mm)	Largura da abertura inferior e (mm)	dv/e	dh/e
5	60,0	36,0	3,0	20,0	12,0

A relação dh/e referente aos dutos do Decantador 2 foi próxima dos valores dos dutos losangulares do Decantador 1. Entretanto, ainda não se pode concluir algo sobre isto, pois apenas com um estudo mais aprofundo testando diferentes larguras da abertura longitudinal inferior, para ser possível verificar a influência desta relação na capacidade de autolimpeza, se há uma relação ótima, máxima ou mínima.

5.7.1.8 Critério 10 – Regime de escoamento

O n° de Reynolds resultante nos dutos do Decantador 2, para uma viscosidade cinemática da água igual a $9,066 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (temperatura média da água igual a $24,7^\circ\text{C}$), foi igual a 110, que permite considerar o fluxo de água plenamente desenvolvido na zona de sedimentação como regime laminar, segundo a literatura – CETESB (1976), Arboleda (2000). Desse modo, esse critério colaborou fornecendo condições apropriadas para a sedimentação dos flocos.

5.7.1.9 Critério 11 – Sedimentação entre os perfis de dutos do arranjo

Os flocos tiveram um comportamento descendente entre os perfis de dutos, sem haver qualquer acúmulo na superfície inclinada externa dos dutos (rampa), ou seja, o deslizamento ocorreu 100% do tempo.

A distância no eixo horizontal entre um duto e outro foi cerca de 2 cm, considerada mais que o suficiente para o experimento testado, visto que os flocos sedimentavam em linha reta no eixo das ordenadas até encostar na rampa externa e em seguida deslizavam ocupando fina camada sobre a superfície.

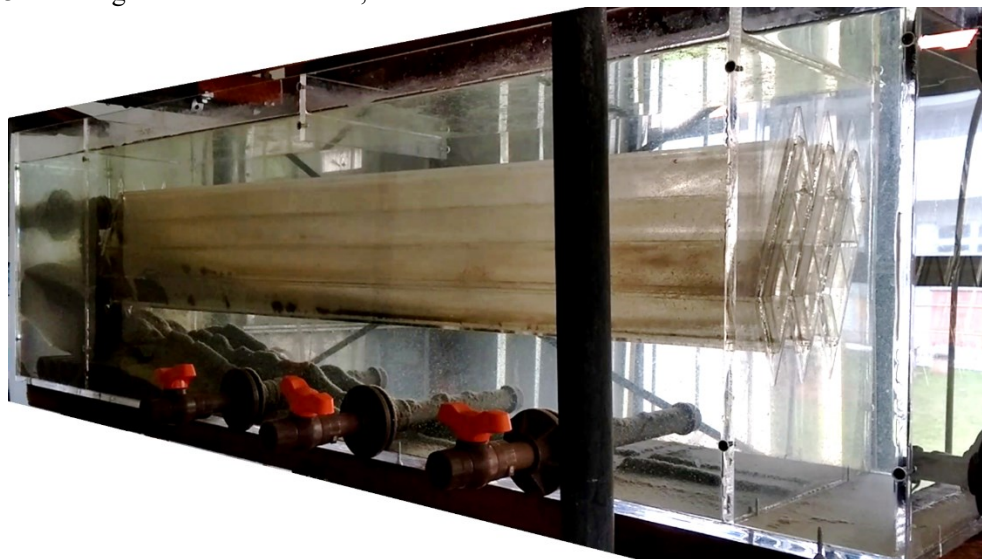
Após saírem pela abertura, os flocos transitaram entre os perfis de dutos, sedimentando até a zona de lodo sem apresentar maiores turbulências ou se desviarem por correntes de fluxo.

5.7.1.10 Considerações sobre a capacidade de autolimpeza

Os dutos losangulares, com ângulo de 60° foram eficazes no fator autolimpeza, promovendo um funcionamento constante sem necessitar de qualquer outro mecanismo de limpeza. Além disso, layout do arranjo de dutos permite que os flocos transitem até a zona de lodo do decantador de modo adequado.

Na Figura 113, pode-se observar que lodo ficou acumulado em linha principalmente no eixo paralelo abaixo das aberturas longitudinais inferiores e do espaço entre os perfis.

Figura 113 – Vista geral do Decantador 2, mostrando o acúmulo na zona de lodo no início do comprimento.



5.7.2 Distância Máxima Alcançada pelos Flocos nos Dutos

Primeiramente, atenta-se para o comprimento alcançado na zona de lodo, onde a maioria do acúmulo ocorreu até a metade do comprimento do decantador. O que demonstra que possivelmente se poderia tratar com uma taxa de escoamento mais elevada.

A média do alcance máximo de lodo notado no interior de cada duto está descrito na Tabela 34. Na mesma, estão colocados os valores das distâncias médias por linha e coluna. As linhas e colunas foram definidas observando o arranjo da câmara de entrada.

Tabela 34 – Distância média do alcance máximo de lodo no interior de cada duto do arranjo, bem como o resultado médio do acúmulo por linha e coluna.

Média do alcance de lodo no duto (cm)		1ª coluna	2ªcoluna	3ª coluna
		49,0	29,3	28,6
1ª linha	16,7	47,4	0,9	1,8
2ª linha	16,4	28,0	6,5	14,6
3ª linha	73,9	71,6	80,5	69,5

A Tabela 34 revela, na verdade, a irregularidade da distribuição da carga de flocos, pois o alcance de lodo é proporcional à concentração de flocos que adentra no duto de sedimentação e à vazão do fluxo. O dispositivo de distribuição da água floculada ocasionava um jato de flocos na entrada de cada duto. A vazão de água até pode ter sido parecida entre os dutos, mas a parcela sólida visivelmente não foi. Por exemplo, o duto da terceira linha e coluna provavelmente recebeu flocos mais leves em sua maioria e, apresentando uma vazão similar aos outros dutos, não apresentou registro de lodo acumulado em seu interior.

5.8 EXTRAPOLAÇÃO PARA ESCALA REAL

5.8.1 Decantadores em Escala Piloto Extrapolados para Admitir uma Alta Taxa de Escoamento Superficial

5.8.1.1 Procedimento para dimensionamento

Nesse tópico, os Decantadores 1 e 2, que em escala piloto apresentaram uma taxa de escoamento superficial de 10,3 e 15,6 m³/m².d, respectivamente, tiveram as profundidades redimensionadas para admitirem uma taxa típica de decantador de alta taxa.

No Decantador 1, os cinco dutos de diferentes geometrias de seção possuem o mesmo comprimento, de 1,44 m. A soma das distâncias horizontais dos dutos é igual a 0,18 m, formando uma zona de sedimentação de área superficial igual a 0,27 m².

Já no Decantador 2, o comprimento do arranjo de dutos é igual a 0,90 m e a largura vista de cima igual a 0,19 m, ou seja, a área superficial é de 0,17 m².

A partir da Equação 16, foi possível calcular a quantidade de camadas (linhas) de dutos sobrepostas necessária para atingir uma taxa de escoamento superficial de 240 m³/m².d nos Decantadores 1 e 2.

$$nl = \frac{240 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot d}{q_i} \quad (16)$$

Onde **nl** = número de linhas de dutos (adim.), **q_i** = taxa do Decantador 1 ou 2 (m³/m².d).

Para determinar a profundidade composta de dutos sobrepostos (aproximada, pois não se considerou a espessura das paredes dos dutos), utilizou-se a Equação 17.

$$H_{sed} = nl \cdot dv \quad (17)$$

Onde **H_{sed}** = altura referente aos dutos de sedimentação sobrepostos (m), **dv** = distância vertical da seção do duto, seja o diâmetro ou diagonal vertical (m).

Todavia, os dutos estão espaçados entre si, posicionados um abaixo do outro, no mesmo eixo vertical, com um número de espaçamentos igual a **nl** -1.

O cálculo da profundidade total do decantador foi o somatório entre H, a parcela referente ao espaçamento entre dutos, a altura de água sobre os mesmos, a borda livre e toda a zona de lodo.

Uma vez que a área superficial foi fixada, a largura da zona de sedimentação (**L_{sed}**) é a razão de **A_{sed}** por **dh_L**. Para calcular quantos dutos cabem justapostos nessa largura de sedimentação do decantador, procedeu-se conforme a Equação 18.

$$nc = \frac{L_{sed}}{dh} \quad (18)$$

Onde **nc** = número de colunas de dutos (adim.); **dh** = distância horizontal da seção do duto, seja o diâmetro ou diagonal horizontal (m).

O número do espaçamento entre os dutos ao longo da largura do decantador foi igual a **nc** + 1. Portanto, a largura total do decantador é igual à soma desses espaçamentos com o **L_{sed}**.

Por meio dos cálculos acima expostos pôde-se obter as dimensões de comprimento, largura e profundidade total dos decantadores.

Como houve um aumento de dutos sobrepostos, a vazão aumentou nessa situação hipotética, sendo recalculada pelo produto da taxa de escoamento de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ com a área superficial de sedimentação de cada decantador em escala piloto (Equação 18).

5.8.1.2 *Aplicação do dimensionamento*

Na extrapolação dos Decantadores 1 e 2, a taxa de escoamento superficial de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ foi alcançada com 23 e 15 camadas de dutos sobrepostas, respectivamente. O que resultou em uma profundidade total da zona de sedimentação de 1,68 e 1,82 m (considerando o espaçamento entre dutos) para o duto de maior diâmetro do Decantador 1 ($d_v = 54 \text{ mm}$) e o duto do Decantador 2 ($d_v = 60 \text{ mm}$), respectivamente.

As Tabela 35 e Tabela 36 demonstram os valores calculados para quantidade de dutos sobrepostos e justapostos, para a profundidade e largura da zona de sedimentação, bem como para as dimensões totais dos decantadores, considerando os parâmetros adotados da Tabela 7 (item 4.10.1).

Tais decantadores foram desenhados para a situação hipotética, sendo apresentado a área superficial em planta e os cortes nas Figuras 114 a 121. Foi feito o extrapolação para cada tipo de duto pertencente ao Decantador 1 (do Duto 1 ao 5), assim como, o extrapolação para o único tipo de duto no Decantador 2. Vale ressaltar que no Decantador 2 não foi possível manter o mesmo padrão do arranjo da unidade piloto, devido à limitação nessa situação hipotética de a área superficial manter-se a mesma.

Tabela 35 – Dimensões do Decantador 1 extrapoladas da escala piloto para tratar com taxa de escoamento superficial de 240 m³/m²d, mantendo o comprimento dos dutos igual a escala piloto, de 1,44 m.

Dutos Decantador 1	Diagonal vertical duto sedimentação <i>dv</i> (m)	Nº dutos sobrepostos <i>nl</i> (adim.)	Profundidade zona de sedimentação <i>H_{sed}</i> (m)	Espaçamento total vertical <i>ev</i> (m)	Profundidade total decantador* <i>H_T</i> (m)	Nº dutos justapostos <i>nc</i> (adim.)	Largura dutos justapostos <i>L_{sed}</i> (m)	Espaçamento total horizontal <i>eh</i> (m)	Largura total do decantador* <i>L_T</i> (m)	Área superficial <i>A_{sed}</i> (m ²)
1	0,0540	23	1,24	0,44	2,53	4	0,22	0,10	0,32	0,31
2	0,0340	23	0,78	0,44	2,07	6	0,20	0,14	0,34	0,29
3	0,0210	23	0,48	0,44	1,77	10	0,21	0,22	0,43	0,30
4	0,0385	23	0,89	0,44	2,18	5	0,20	0,12	0,32	0,28
5	0,0345	23	0,79	0,44	2,08	6	0,22	0,14	0,36	0,31

*considerando os valores adotados da Tabela 7.

Tabela 36 – Dimensões do Decantador 2 extrapoladas da escala piloto para taxa de escoamento superficial de 240 m³/m²d e com comprimento dos dutos de 0,90 m.

Duto Decantador 2	Diagonal vertical duto sedimentação <i>dv</i> (m)	Nº dutos sobrepostos <i>nl</i> (adim.)	Profundidade zona de sedimentação <i>H_{sed}</i> (m)	Espaçamento total vertical <i>ev</i> (m)	Profundidade total decantador* <i>H_T</i> (m)	Nº dutos justapostos <i>nc</i> (adim.)	Largura dutos justapostos <i>L_{sed}</i> (m)	Espaçamento total horizontal <i>eh</i> (m)	Largura total do decantador* <i>L_T</i> (m)	Área superficial <i>A_{sed}</i> (m ²)
Losango 60°	0,0600	15	1,38	0,28	2,51	6	0,22	0,14	0,36	0,19

*considerando os valores adotados da Tabela 7.

Com o extrapolamento, os Decantadores 1 e 2, ao invés de tratarem 1,9 L/min, aumentariam suas vazões para 44 e 29 L/min, respectivamente, devido à adição de camadas sobrepostas.

Vale ressaltar que essa extrapolação em específico teve objetivo de demonstrar quantas camadas de dutos seriam necessárias de se apresentar nas unidades em escala piloto para tratar uma alta taxa, de 240 m³/m².d, e de se visualizar um esboço do resultado graficamente para cada tipo de duto.

Figura 114 – Planta extrapolação Decantador 1.

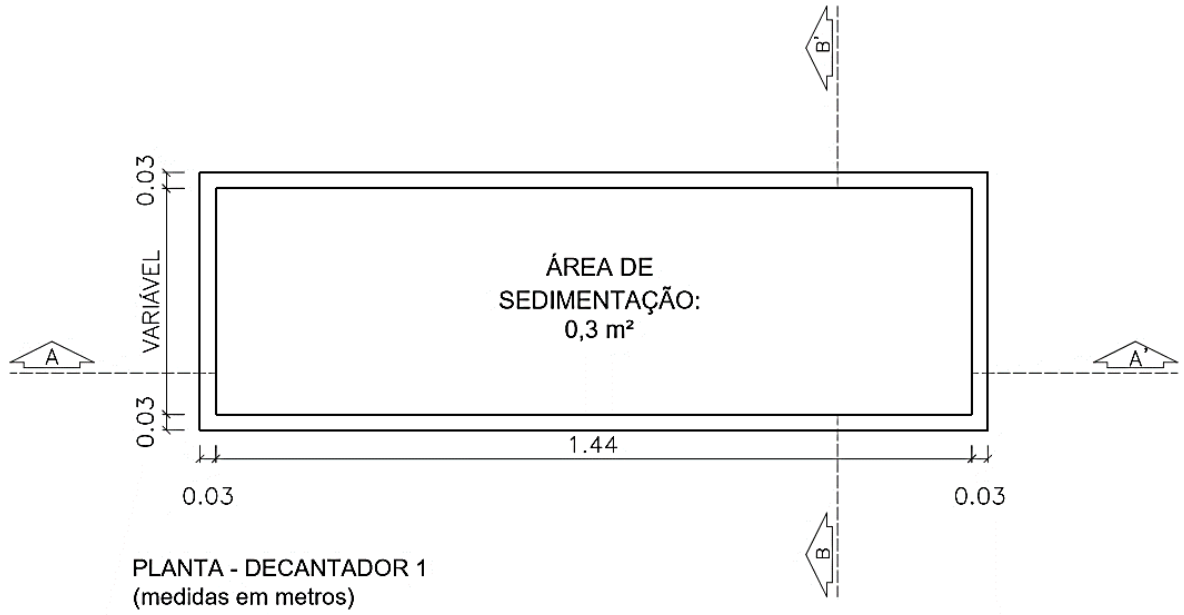


Figura 115 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 1.

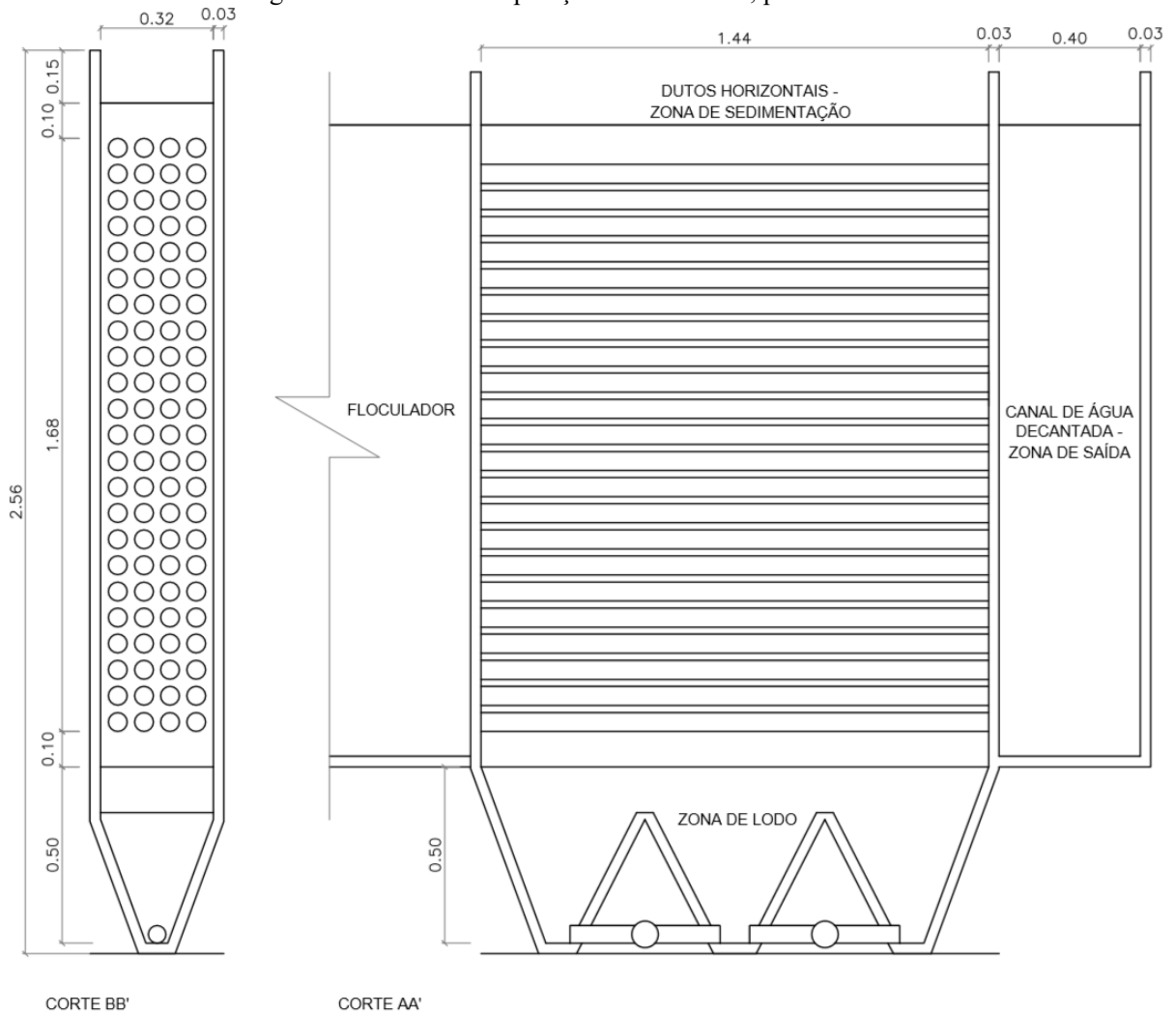


Figura 116 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 2.

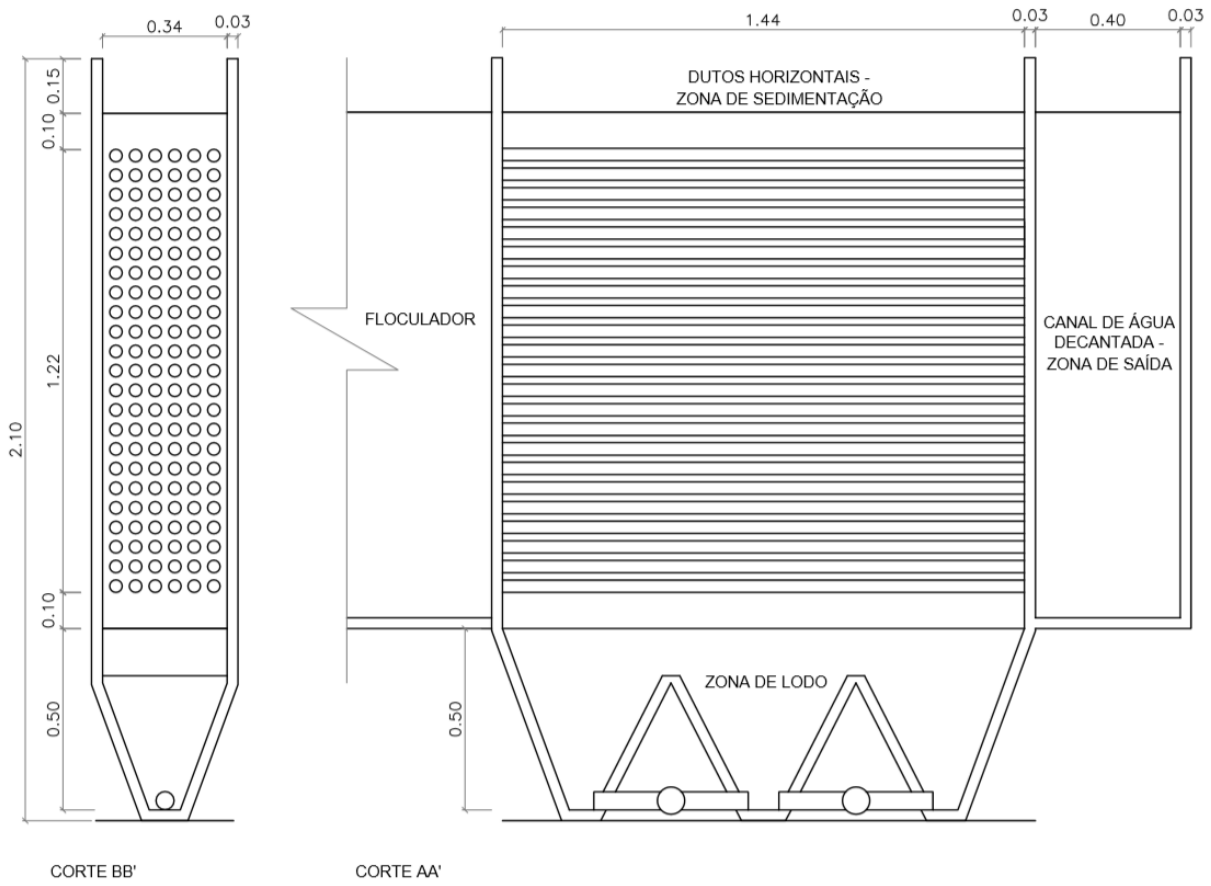


Figura 117 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 3.

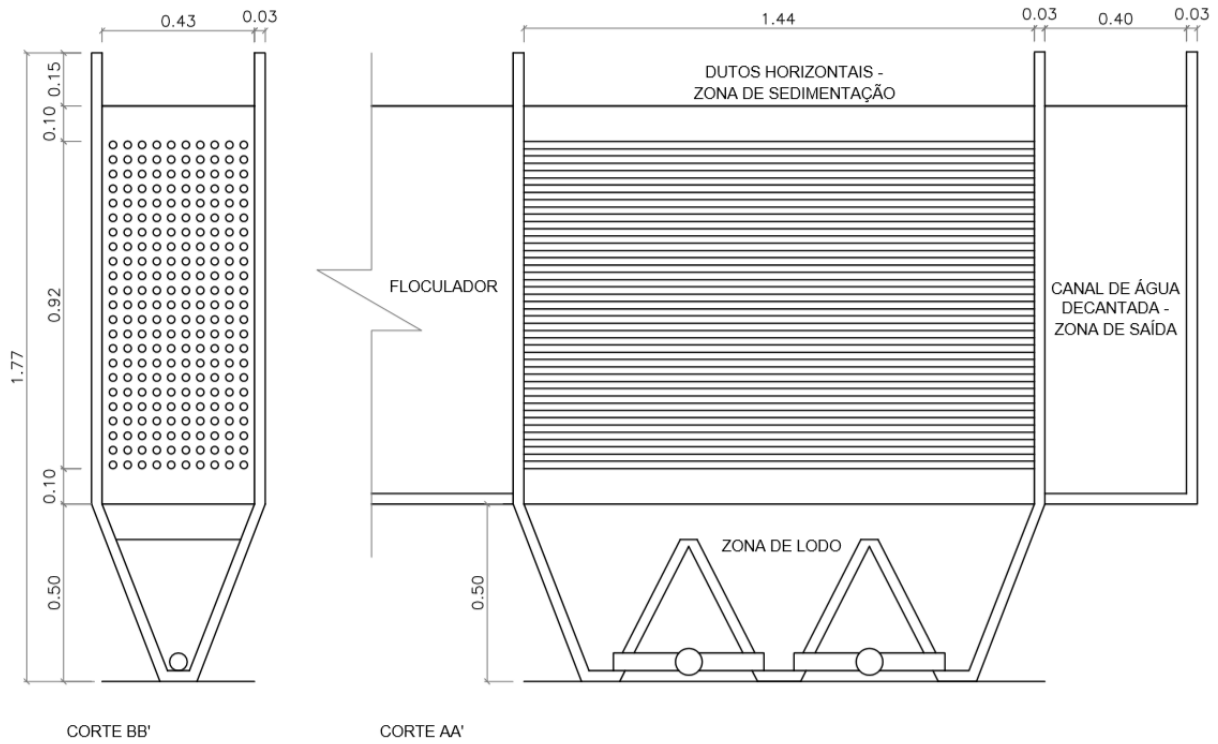


Figura 118 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 4.

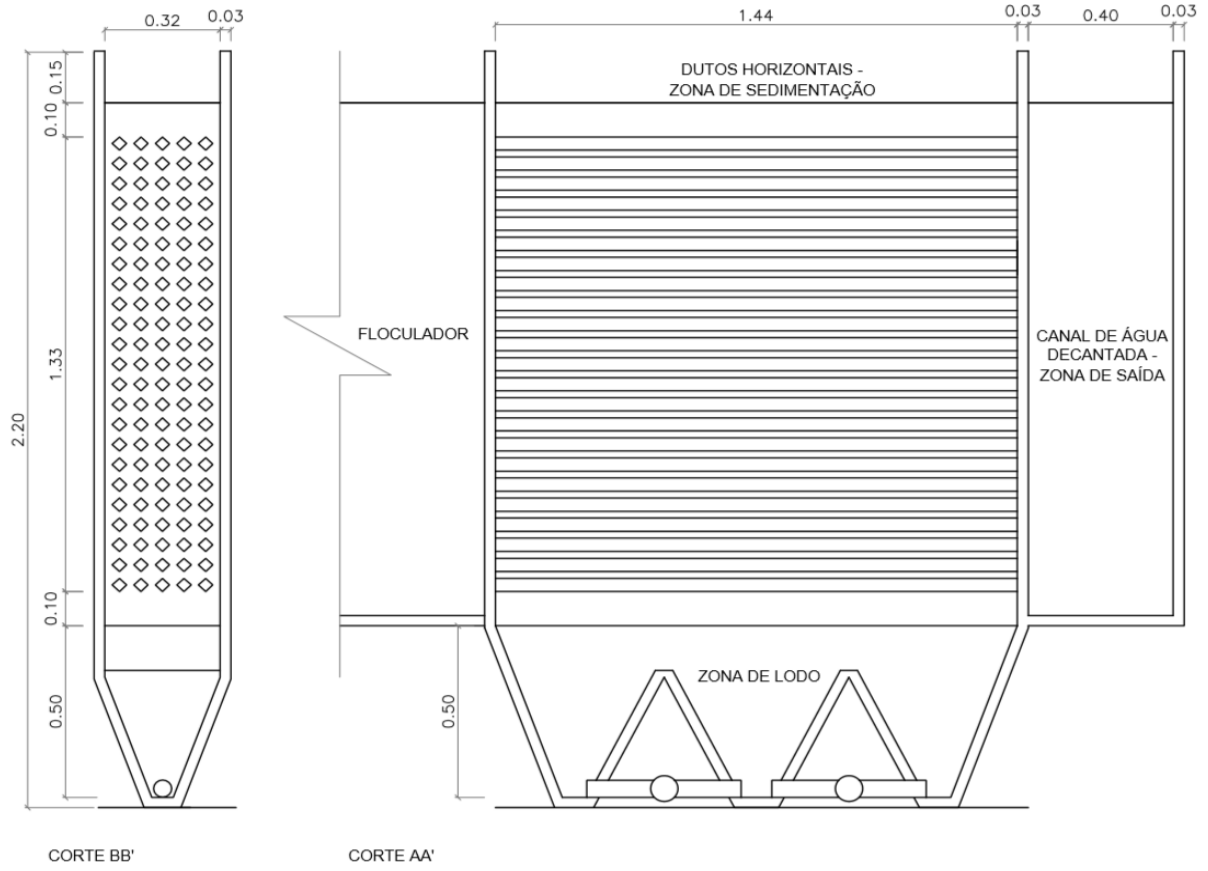


Figura 119 – Corte extrapolação Decantador 1, para o Duto 5.

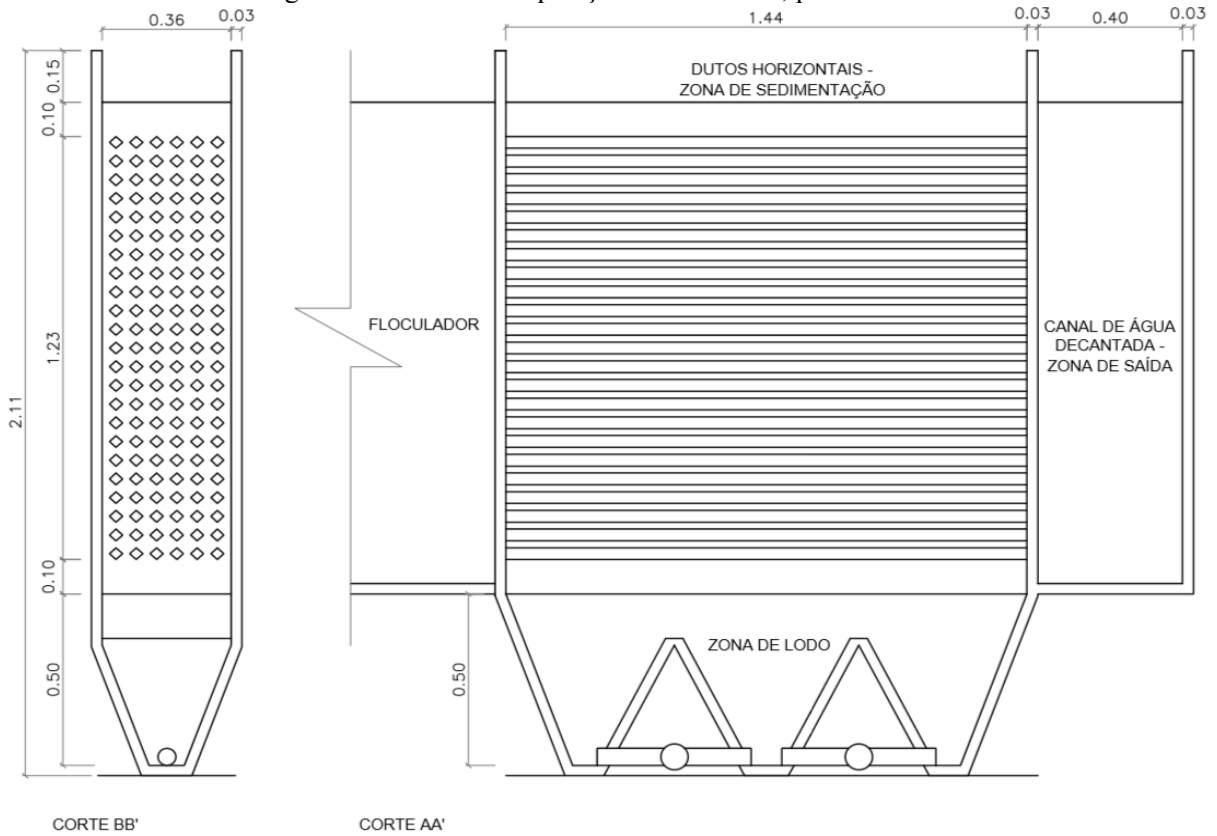


Figura 120 – Planta extrapolação Decantador 2.

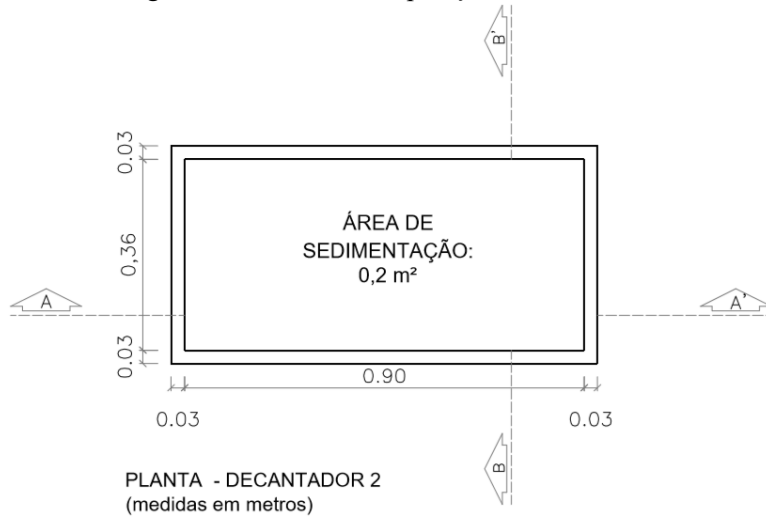
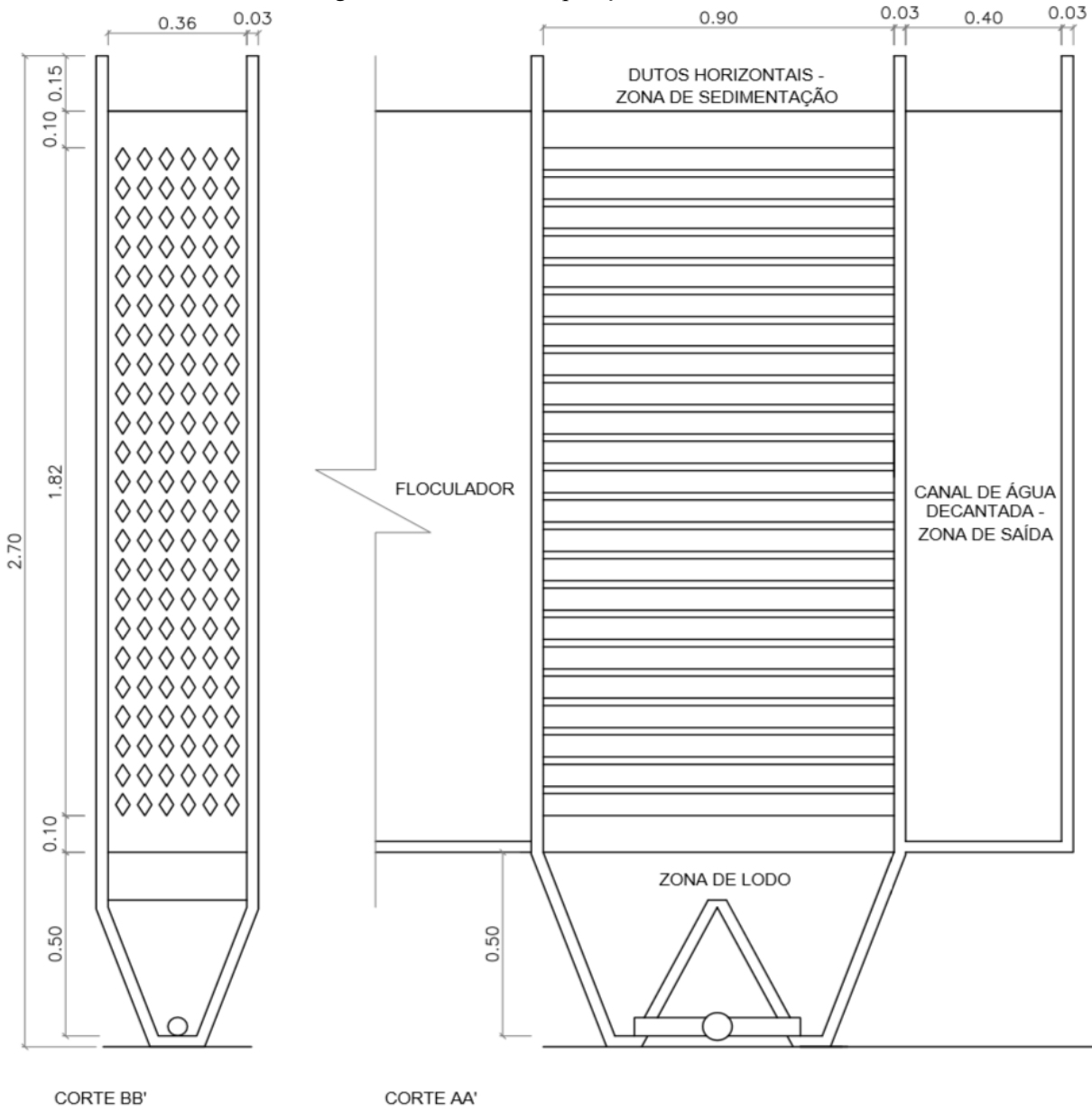


Figura 121 – Corte extrapolação Decantador 2.



5.8.2 Elaboração de Layouts do Decantador em Escala Real

O procedimento para extrapolação dos decantadores em escala real teve como primeira etapa a determinação da vazão individual de cada duto, que varia de acordo com o formato e tamanho. Com isso, foi possível determinar o número total de dutos necessários para atender a vazão que se deseja tratar. Nesta etapa, ainda foi apropriado calcular o comprimento de cada duto para, em seguida, realizar-se o dimensionamento dos arranjos.

5.8.2.1 Determinação da vazão individual, do número total de dutos e do comprimento individual

A vazão individual de cada duto foi calculada pelo produto entre a área molhada da seção pela velocidade de escoamento longitudinal adotada (Equação 18).

$$Q_{duto} = A_{duto} \cdot v_0 \quad (18)$$

Onde: Q_{duto} = vazão individual do duto (m^3/d); A_{duto} = área molhada do duto (m^2); v_0 = velocidade de escoamento longitudinal (m/d).

O número total de dutos no decantador foi a razão da vazão total a ser tratada pela vazão individual de cada duto. O cálculo é apresentado na Equação 19.

$$N_T = \frac{Q_{dec}}{Q_{duto}} \quad (19)$$

Onde: N_T = número total de dutos necessários no arranjo; Q_{dec} = vazão total a ser tratada por decantador (m^3/d).

Já o comprimento dos dutos (dh_L) foi calculado multiplicando-se o comprimento relativo (L_r) pela diagonal vertical do duto (d_v) para dutos losangulares, ou pelo diâmetro (\emptyset) para dutos circulares. Este procedimento é apresentado na Equação 20.

$$dh_L = L_r \cdot d_v \text{ ou } L_r \cdot \emptyset \quad (20)$$

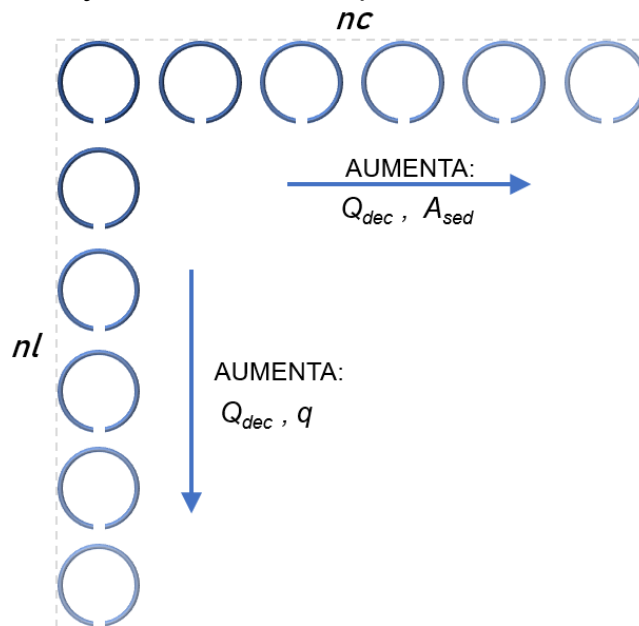
Onde: dh_L = comprimento do duto (m); L_r = comprimento relativo (adimensional); d_v = diagonal vertical do duto losangular (m); \emptyset = diâmetro do duto circular (m).

5.8.2.2 Dimensionamento geral para o arranjo dos dutos

O arranjo dos dutos assemelha-se a uma matriz, contendo linhas e colunas inclinadas. O número de linhas agrega altura à zona de sedimentação, enquanto o número de colunas

agrega largura ao decantador. Quanto maior o número de linha, maior a vazão que pode ser tratada, porém maior a área superficial de sedimentação; já quanto maior for o número de colunas de dutos, maior a vazão a ser tratada no decantador, e maior a taxa de escoamento superficial, como esquematizado na Figura 122.

Figura 122 – Relação dos parâmetros de decantação com o aumento do número de colunas (nc) e número de linhas (nl) de um arranjo de dutos da conformação interna de um decantador tubular horizontal.



Legenda: Q_{dec} = vazão do decantador; A_{sed} = área superficial de sedimentação; q = taxa de escoamento superficial.

Quando é feito um projeto de um novo decantador (e não uma reforma), o número de linhas e colunas pode ser adotado livremente, mas quando o espaço é limitado, no caso de reformas em ETAs existentes, calcula-se o número de linhas ou de colunas que se adequem às dimensões do local.

Vale ressaltar que a quantidade de linhas e colunas deve ser definida de modo que respeite o número total de dutos necessários (calculado previamente), conforme apresenta a Equação 21.

$$N_T = n_l \cdot n_c \quad (21)$$

Onde: N_T = número total de dutos no arranjo, n_l = número de linhas de dutos; n_c = número de colunas de dutos.

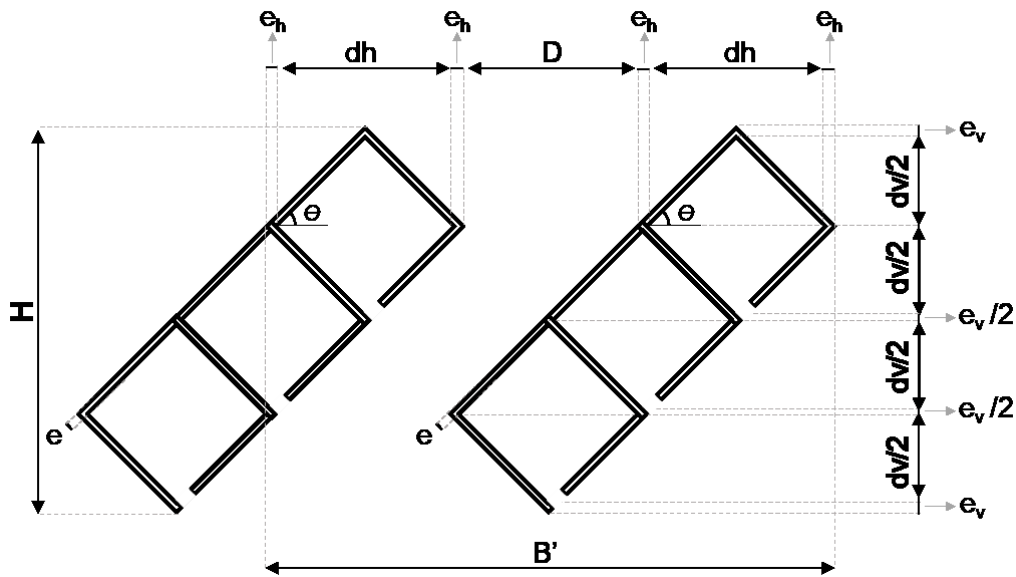
Na adoção do número de linhas e colunas é aceitável que se faça pequenos arredondamentos no número total de dutos, desde que não se altere significativamente a vazão de projeto ou a taxa de escoamento adotados.

Os dutos losangulares se encaixam de maneira diferente dos dutos circulares no arranjo, portanto, o dimensionamento se difere para os dois formatos.

5.8.2.2.1 Dutos Losangulares

No dimensionamento de decantadores novos, a altura e a largura da área de sedimentação são proporcionais ao número de linhas e colunas adotados, respectivamente. Para exemplificar, a Figura 123 apresenta um arranjo contendo 3 linhas e 2 colunas de dutos.

Figura 123 – Parâmetros de dimensionamento inerentes ao layout do arranjo de dutos losangulares.



Legenda: H= altura da zona de sedimentação; e = espessura da parede do duto; e_h = espessura da parede do duto no eixo horizontal; e_v = espessura da parede do duto no eixo vertical; θ = ângulo de inclinação dos dutos no arranjo; dh = distância horizontal da seção do duto; dv = distância vertical da seção do duto; B' = largura prévia do decantador.

O arranjo dos dutos foi feito de maneira que, em cada coluna, esses dutos fiquem justapostos. Sendo assim, a altura (H) será composta somando-se a metade das distâncias verticais ($dv/2$) de cada duto, acrescidas a espessura da parede (e) com o valor corrigido, de acordo com a inclinação da parede (e_v). Como no primeiro duto de cada coluna não há acréscimo de outro duto na parte superior, a metade da distância vertical e a espessura da parede deverão ser consideradas duas vezes.

A largura prévia (B') é composta pela distância horizontal interna dos dutos (dh), acrescida da espessura horizontal da parede (e_h) nos dois lados e do espaçamento entre os dutos (D). De modo que o conjunto de dutos inclinados fique com os vértices alinhados no eixo vertical e horizontal, recomenda-se que o espaçamento entre dutos seja igual à distância horizontal da seção de um duto ($D = dh$).

As espessuras corrigidas da parede dos dutos no arranjo, de acordo com o ângulo de inclinação, podem ser determinadas através das Equações 22 e 23.

$$e_v = \frac{e}{\cos \theta} \quad (22)$$

$$e_h = \frac{e}{\sin \theta} \quad (23)$$

Onde: e = espessura da parede do duto (m), e_v = espessura da parede no eixo vertical (m), e_h = espessura da parede no eixo horizontal (m), θ = ângulo de inclinação das paredes ($^\circ$).

A altura e a largura prévia da zona de sedimentação do decantador podem ser obtidas através das Equações 24 e 25.

$$H_{sed} = (nl + 1) \cdot \frac{dv}{2} + (nl - 1) \cdot \frac{e_v}{2} + 2 \cdot e_v \quad (24)$$

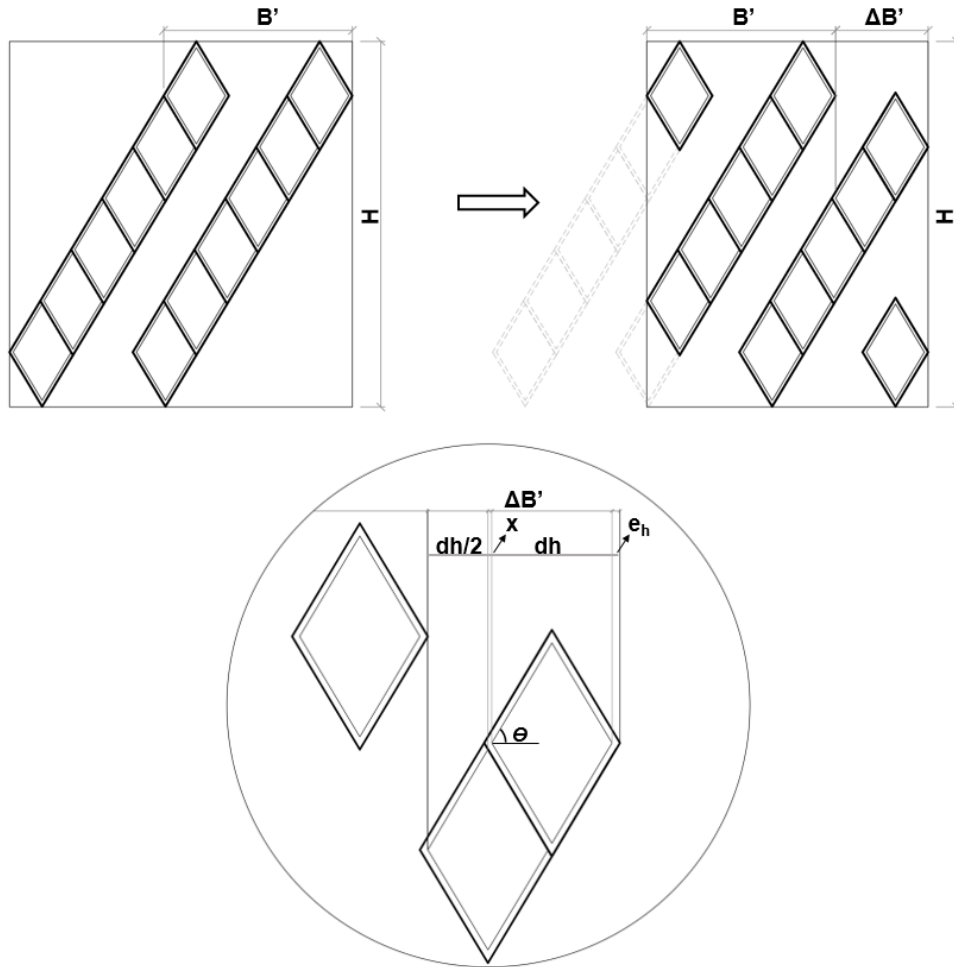
Onde: H_{sed} = altura referente aos dutos sobrepostos (m); N_l = número de dutos em linha, dv = distância vertical interna entre as paredes do duto (m).

$$B' = nc \cdot (2 \cdot e_h + dh + D) - D \quad (25)$$

Onde: B' = largura prévia do arranjo (m), nc = número de colunas de dutos, dh = distância horizontal interna entre as paredes do duto (m), D = espaçamento entre duas colunas de dutos (m).

A largura prévia corresponde à distância ocupada pelo número de colunas da matriz, caso os dutos fossem posicionados em linha reta, um embaixo do outro. No entanto, como os dutos são empilhados na diagonal, é conveniente ajustar as extremidades do arranjo para criação de módulos unitários (blocos). Esses blocos possuem dimensões fixadas e a praticidade de serem encaixados exatamente um ao lado do outro. Tal ajuste acarretará um acréscimo na largura ($\Delta B'$) e tenderá a ser um valor não representativo, pois a soma ocorre apenas na largura total do decantador, e não em cada bloco. O ajuste pode ser visualizado na Figura 124.

Figura 124 – Desenho explicativo para o acréscimo de largura a partir da formatação dos dutos losangulares em blocos.



O acréscimo da largura envolve a determinação do termo “x”, mostrado no desenho, calculado por meio da Equação 26. O ajuste na largura não depende do número de colunas da matriz, podendo ser calculado através da Equação 27.

$$x = \frac{\cos \theta \cdot e}{\text{sen} (180^\circ - 2\theta)} \quad (26)$$

$$\Delta B' = 1,5 \cdot dh + x + e_h \quad (27)$$

Onde: x = parcela da espessura horizontal (m), $\Delta B'$ = acréscimo da largura após o ajuste (m).

A largura total do decantador será então o somatório da largura prévia com o acréscimo gerado pelo ajuste, conforme ilustrado na Equação 28.

$$B = B' + \Delta B' \quad (28)$$

Onde: B = largura total do decantador (m), B' = largura prévia do arranjo (m).

Quando a altura e o comprimento disponíveis são limitados, como é o caso de decantadores já existentes em reforma utilizando dutos horizontais, o número de linhas e

colunas podem ser calculados isolando as variáveis nl e nc das Equações 24 e 25, obtendo-se as Equações 29 e 30.

$$nl = \frac{H_{sed} - \frac{dv}{2} + \frac{ev}{2} - 2e_v}{\frac{dv}{2} + \frac{ev}{2}} \quad (29)$$

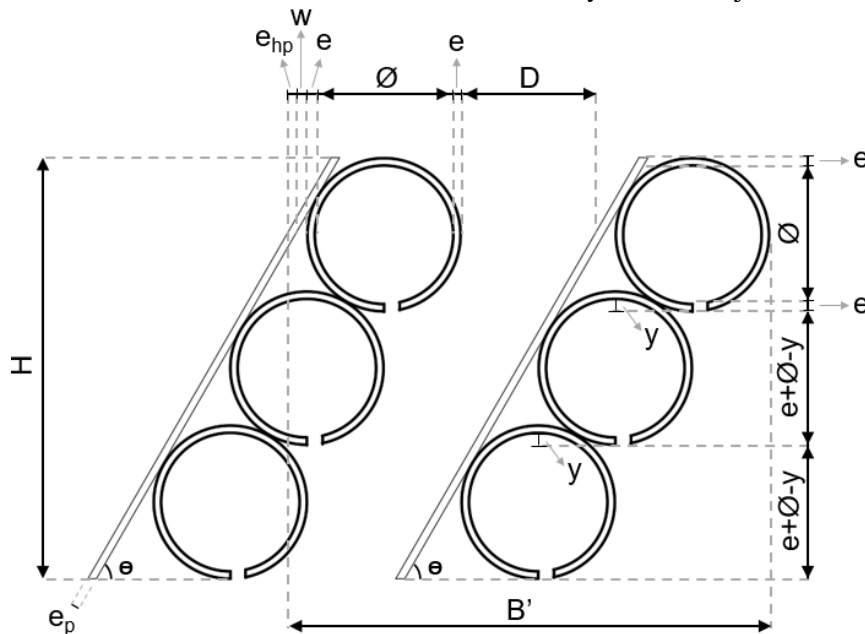
$$nc = \frac{B' + D}{2 \cdot e_h + dh + D} \quad (30)$$

Por exemplo, um módulo unitário de 120 linhas e 250 colunas possui dimensões de 1,0 m de largura x 1,2 m de altura. Serão necessários 20 blocos ao longo da largura para preencher um decantador de 20 m de largura, sendo a altura da zona de sedimentação igual a 1,2 m. Em casos de medidas não inteiras do decantador, os blocos poderão ser cortados, de modo que se realize o encaixe.

5.8.2.2.2 Dutos Circulares

Da mesma forma que nos dutos losangulares, o arranjo dos dutos circulares foi composto de linhas e colunas. No entanto, o formato circular exigiu a fixação de uma placa para sustentação dos dutos. A Figura 125 ilustra o layout do arranjo.

Figura 125 – Parâmetros de dimensionamento inerentes ao layout do arranjo de dutos circulares.



Legenda: H = altura da zona de sedimentação; e_p = espessura da placa de sustentação no eixo horizontal; α = ângulo de inclinação dos dutos no arranjo; e_{hp} = espessura da placa de sustentação no eixo horizontal; w = distância entre a parede externa do duto e a placa de sustentação; e = espessura da parede do duto, tanto na horizontal como vertical; \emptyset = diâmetro do duto; y = distância de sobreposição dos dutos ao visualizá-los no eixo vertical; B' = largura prévia do decantador.

A espessura das placas de sustentação foi de 2 mm e a inclinação é de 60°. O cálculo das dimensões do arranjo foi similar aos dutos losangulares. Deve-se incluir na composição da largura prévia (B'), a espessura horizontal da placa (e_{hp}) e o espaçamento (w) entre a placa e a parede do duto. Estas dimensões foram obtidas através das Equações 31 e 32, respectivamente.

$$e_{hp} = \frac{e_p}{\text{sen } \alpha} \quad (31)$$

$$w = \frac{\frac{\emptyset}{2} + e}{\text{sen } \alpha - \frac{\emptyset}{2} - e} \quad (32)$$

Onde: e_{hp} = espessura horizontal da placa (m), e_p = espessura da placa (m), α = ângulo de inclinação da placa (°); w = espaçamento entre a placa e a parede do duto (m); \emptyset = diâmetro interno do duto (m); e = espessura da parede do duto (m).

Desta maneira, a largura em linha pode ser obtida através da Equação 33.

$$B' = nc \cdot (2e + \emptyset + e_{hp} + w + D) - D \quad (33)$$

Onde: B' = largura em linha do arranjo (m); nc = número de colunas adotado; D = espaçamento entre as colunas (m).

Os dutos circulares devem ser fixados na placa inclinada e também apoiados uns nos outros, com a parede do duto acima encostando na parede do duto abaixo. É possível observar na Figura 125 que existe uma distância (y) em que há a sobreposição de dois dutos quando traçada uma linha horizontal paralela entre eles.

Este espaçamento aumenta de forma não linear de acordo com o aumento do diâmetro do duto. Desta forma, para que seja realizado o cálculo da altura do arranjo, faz-se necessário um esboço prévio da configuração, de modo que se obtenha o valor do espaçamento “ y ”.

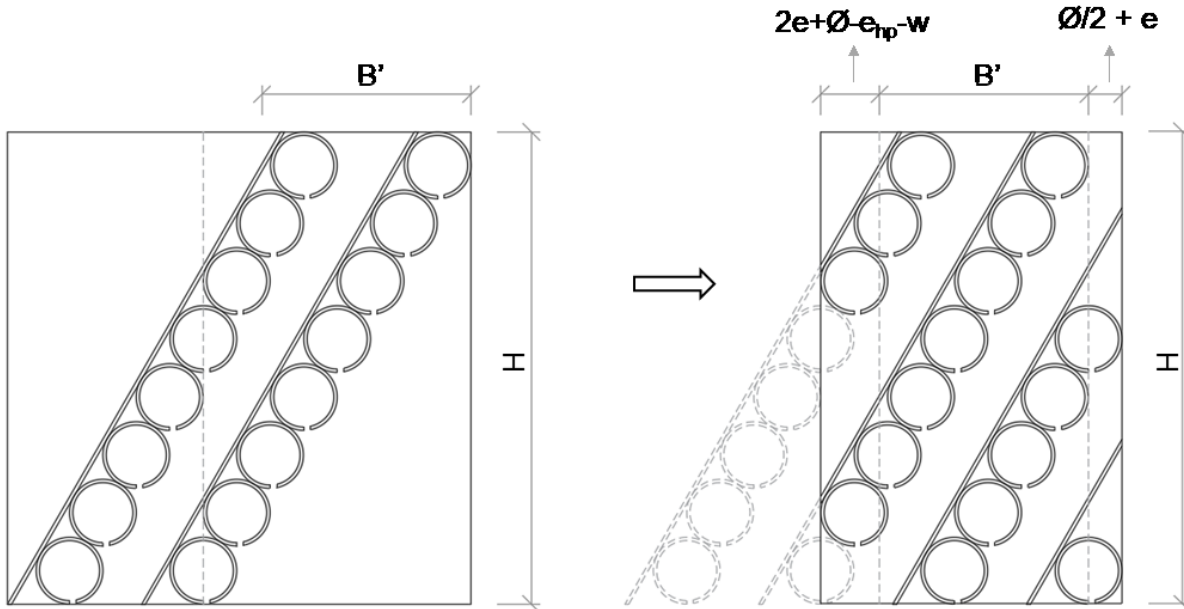
A altura do arranjo é determinada então, através da Equação 34.

$$H_{sed} = (nc - 1) \cdot (\emptyset + e - y) + \emptyset + 2e \quad (34)$$

O arranjo de dutos circulares também pode ser adaptado em módulos, o que acarretará um acréscimo na largura ($\Delta B'$). De maneira análoga aos dutos losangulares, o

acrécimo quando extrapolado para escala real, tenderá a ser um valor não representativo. O ajuste do arranjo pode ser visualizado na Figura 126.

Figura 126 – Desenho explicativo para o acréscimo de largura a partir da formação dos dutos circulares em blocos.



O acréscimo da largura é determinado através da Equação 35.

$$\Delta B' = 3e + \frac{3\phi}{2} - e_{hp} - w \quad (35)$$

Onde: $\Delta B'$ = acréscimo da largura após o ajuste (m).

A largura total do decantador é o somatório da largura prévia com o acréscimo gerado pelo ajuste, conforme já considerado na Equação 28.

5.8.3 Exemplo Tipo de Dimensionamento

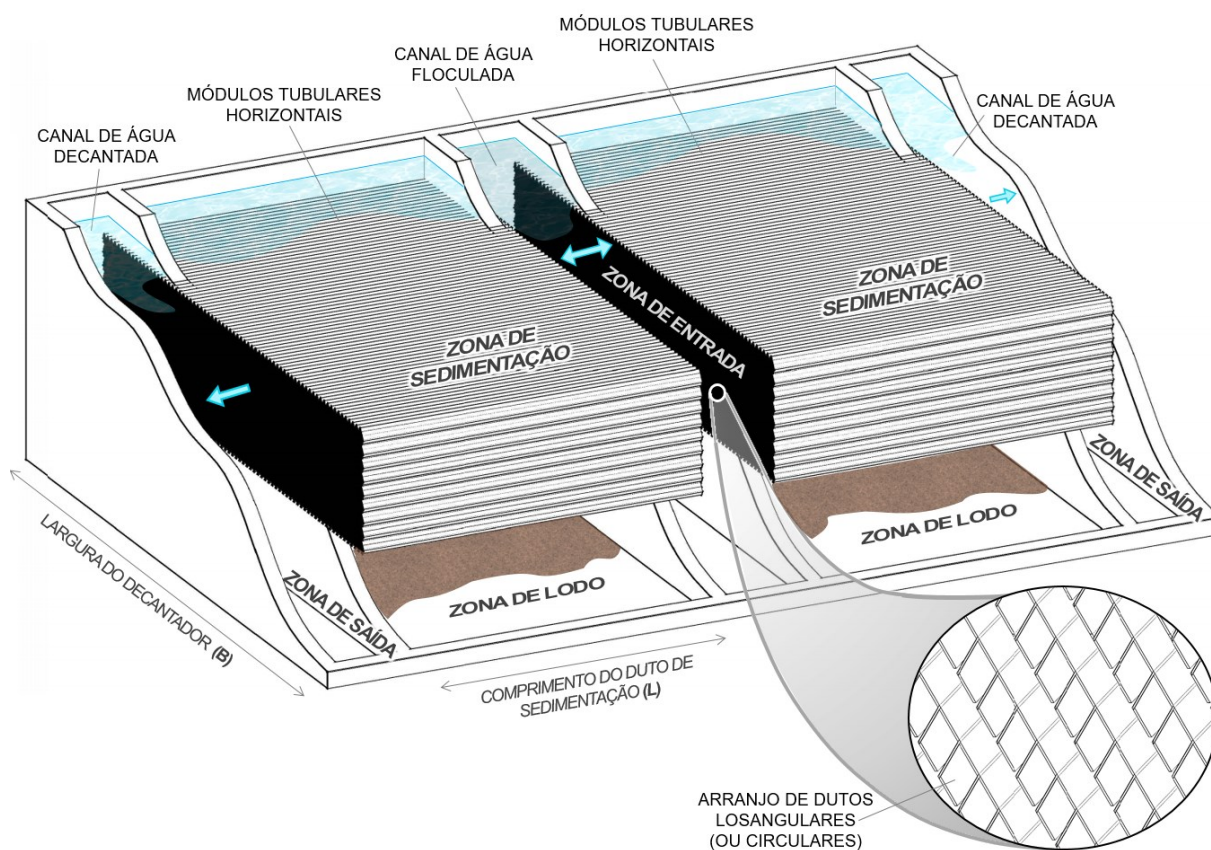
Nesse tópico, foi elaborado um exemplo de dimensionamento do decantador *MLSens* a fim de comparar com um decantador existente em uma ETA do tipo convencional, projetada para uma vazão nominal de 2000 L/s, contendo 16 decantadores de alta taxa com placas paralelas inclinadas, com vazão de 125 L/s por unidade, e com taxa de escoamento superficial de 151 m³/m².d.

A Tabela 37 contém os principais parâmetros resumidos do decantador existente.

Tabela 37 – Parâmetros referentes ao decantador existente, de alta taxa com placas paralelas inclinadas.

Parâmetro	Valor
Vazão da unidade (L/s)	125,0
Largura total do decantador (m)	15,95
Comprimento total do decantador (m)	6,40
Altura das placas paralelas (m)	1,27
Altura lâmina d'água sobre as placas (m)	1,20
Altura da zona de lodo (m)	2,23
Borda livre (m)	0,50
Altura total do decantador (m)	5,20
Área superficial de sedimentação (m ²)	71,50
Taxa de escoamento superficial (m ³ /m ² .d)	151,0
Área total construída	105,0

Primeiramente, está ilustrado na Figura 127, o modelo da configuração aproximada que os decantadores do tipo *MLSens* serão organizados para este exemplo em específico de dimensionamento. Nesse layout, há um canal central de distribuição da água floculada, dividindo a zona de sedimentação em dois lados. Nas extremidades (saída) de cada parcela dos dutos se localizam os canais que recebem a água decantada. A zona de lodo, na verdade, será idêntica ao decantador existente, ou seja, com poços trapezoidais invertidos e descarga hidráulica do lodo, não correspondendo exatamente à ilustração.

Figura 127 – Configuração de uma unidade de decantação *MLSens* para este exemplo de dimensionamento.

Foi considerada uma altura mínima da lâmina d'água de 0,10 m acima dos dutos no decantador *MLSens*, enquanto que a altura do decantador de placas paralelas apresentava uma distância de 1,20 m entre o topo das placas e o nível d'água. A necessidade de uma lâmina da água maior sobre as placas inclinadas é decorrente do fluxo ser vertical.

As placas inclinadas a 60° possuem uma altura de 1,27 m, resultando em 2,47 m entre o início da base das placas e o nível d'água. Desta forma, a altura de sedimentação disponível para a extrapolação foi de 2,37 m, ou seja, há uma altura maior para dispor os dutos horizontais sobrepostos.

5.8.3.1 *Cenário 1: fixando a área superficial de sedimentação e a altura do decantador MLSens iguais ao do decantador de placas inclinadas*

De acordo com o exposto acima e adoções descritas na metodologia, nesse cenário, se dispôs dos dados de entradas apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Dados de entrada para o cálculo de extrapolação do decantador proposto.

Parâmetro	Valor
Área superficial de sedimentação: A_{sed} (m ²)	71,5
Altura do decantador: H_{dec} (m)	5,2
Velocidade de escoamento longitudinal: v_0 (cm/min)	40,0
Velocidade de sedimentação: v_s (cm/min)	1,25

Com a altura de sedimentação fixada em 2,37 m (H_{sed}), foi possível calcular o número de linhas do arranjo que essa altura comporta (Equação 29). A partir da área de superficial de cada metade da zona de sedimentação (35,75 m²) e do comprimento do duto horizontal (obtido através da Equação 20), foi possível obter a largura de sedimentação do decantador. O número de colunas do arranjo que são admitidos justapostos ao longo dessa largura foi calculado por meio da Equação 30, considerando uma espessura da parede do duto de 2 mm. O espaçamento entre os dutos losangulares foi igual a distância

A fim de deixar o arranjo com um formato retangular, ou seja, de formar os módulos unitários que aproveitem melhor as extremidades dos dutos com as paredes do decantador, aplicou-se a Equação 27 (para os dutos losangulares) e a Equação 33 (para o duto circular) para fazer a correção da largura.

Após o arredondamento do número de linhas e de colunas do arranjo para se obter números inteiros, pôde-se calcular o número total de dutos (Equação 21). Com o produto entre o número total de dutos e a vazão individual de cada duto (calculada através da Equação 18) obteve-se a vazão total do decantador.

A vazão de ambos tipos de decantadores de alta taxa podem então ser comparadas, bem como a taxa de escoamento superficial, calculada pela Equação 9.

Na Tabela 39 estão dispostos os parâmetros calculados nesse processo de extrapolação. Os desenhos dos decantadores extrapolados para cada tipo de módulo estão presentes nas Figuras 128.a e 128.b.

Tabela 39 – Parâmetros calculados para a extrapolação do decantador *MLSens*, fixando a área superficial de sedimentação e a altura iguais do decantador de alta taxa com placas inclinadas.

Duto	Círculo 36 mm	Losango 45° 36 mm	Losango 60° dv = 36 mm	Losango 60° dh = 36 mm
Diâmetro ou lado: \emptyset (m)	0,0360	0,0255	0,0208	0,0360
Diagonal vertical: dv (m)	0,0360	0,0360	0,0360	0,0600
Diagonal horizontal: dh (m)	0,0360	0,0360	0,0208	0,0360
Área molhada da seção: A_i (m ²)	0,0010	0,0006	0,0004	0,0011
Velocidade de escoamento: v_0 (m/d)	576	576	576	576
Vazão individual do duto: Q_i (m ³ /d)	0,59	0,37	0,22	0,62
Comprimento do duto: dh_L (m)	1,15	1,15	1,15	1,92
Comprimento relativo: L_r	32	32	32	32
Espessura da parede do duto: e (m)	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020
Espessura da placa de sustentação: ep (m)	0,0020	-	-	-
Ângulo inclinação com a horizontal: Θ (°)	60	45	60	60
Espessura da placa na horizontal: ehp (m)	0,0023	-	-	-
Distância entre duto e placa: w (m)	0,0031	-	-	-
Distância de sobreposição: y (m)	0,0034	-	-	-
Espessura da parede na horizontal: eh (m)	-	0,0028	0,0023	0,0023
Espessura da parede na vertical: ev (m)	-	0,0028	0,0040	0,0039
Espaçamento entre dutos: D (m)	0,0346	0,0360	0,0208	0,0360
Altura disponível para dutos: H_{sed} (m)	2,37	2,37	2,37	2,37
Número de linhas que cabem na altura	65,7	120,9	117,3	73,1
Número de linhas adotado: nl	68	121	117	73
Área total de sedimentação: A_{sed} (m ²)	71,50	71,50	71,50	71,50
Área de cada lado de sedimentação (m ²)	35,75	35,75	35,75	35,75
Largura do decantador: B' (m)	31,09	31,09	31,09	18,62
Nº de colunas que cabem na largura	389,0	400,8	673,5	243,3
Número de colunas adotado: nc	389	400	673	243
Largura ocupada por dutos: B' (m)	31,09	31,03	31,06	18,59
Valor de x , da correção		0,0014	0,0012	0,0012
Correção da largura: ΔB (m)	0,055	0,058	0,035	0,057
Largura decantador corrigida: B (m)	31,14	31,08	31,10	18,65
Número final total de dutos: NTf	52.904	96.800	157.482	35.478
Vazão total do decantador (L/s)	359	418	393	255
Área total de sedimentação (m ²)	71,6	71,5	71,5	71,6
Taxa de escoamento sup.(m³/m².d)	433	505	474	308

Figura 128a - Extrapolação dos módulos de sedimentação do tipo *MLSens* para apresentar a mesma área de sedimentação e altura final do decantador

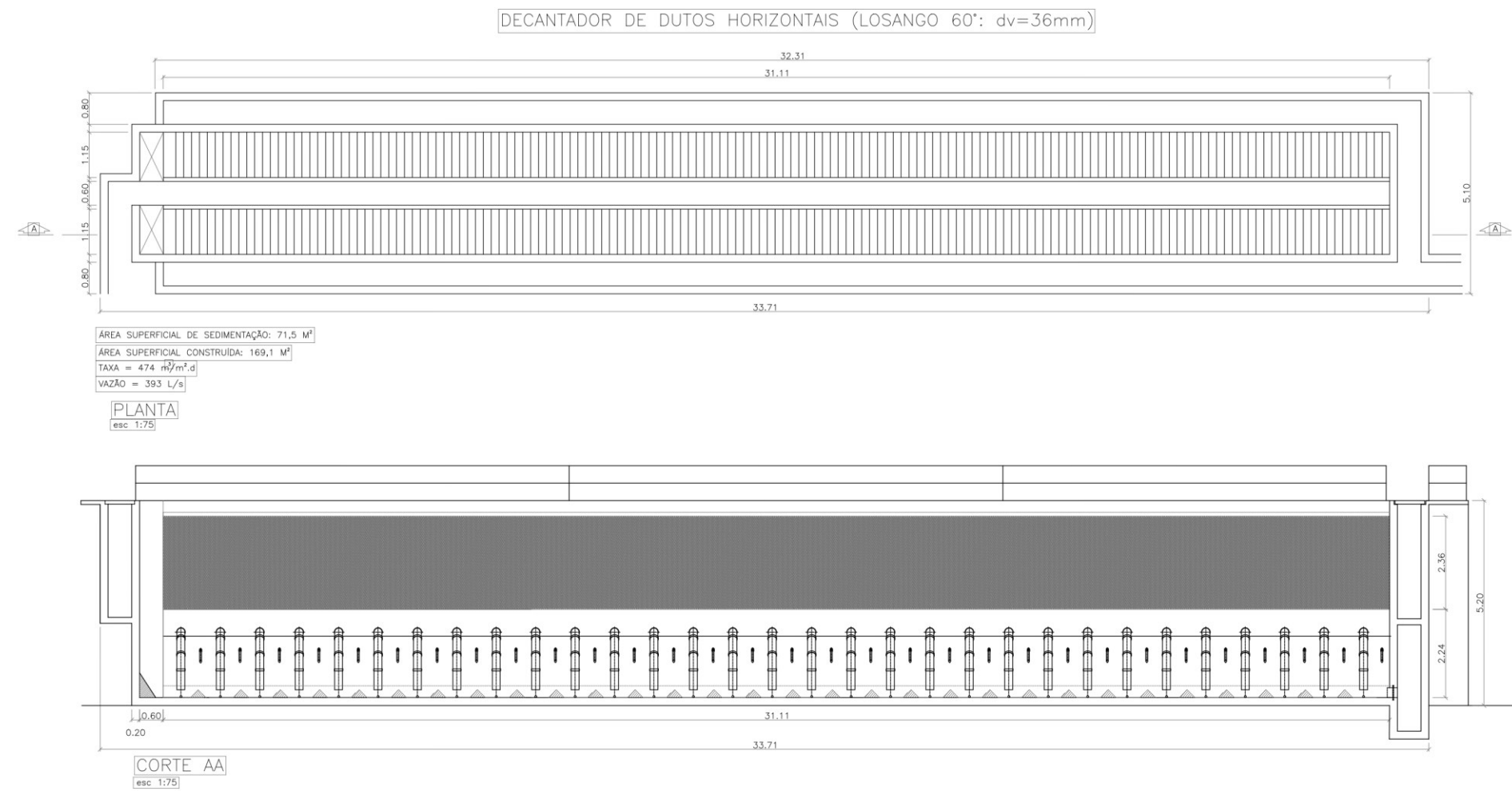
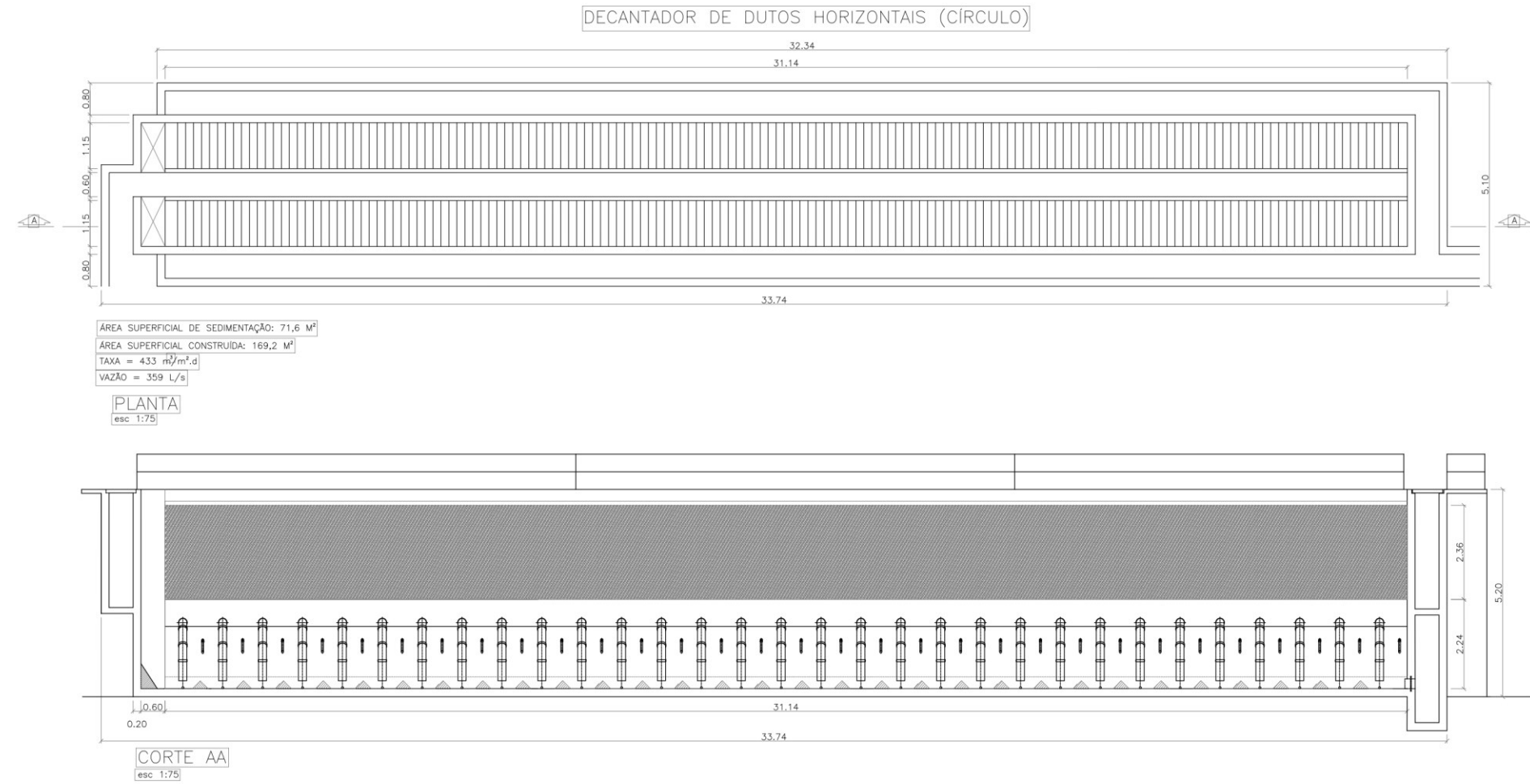
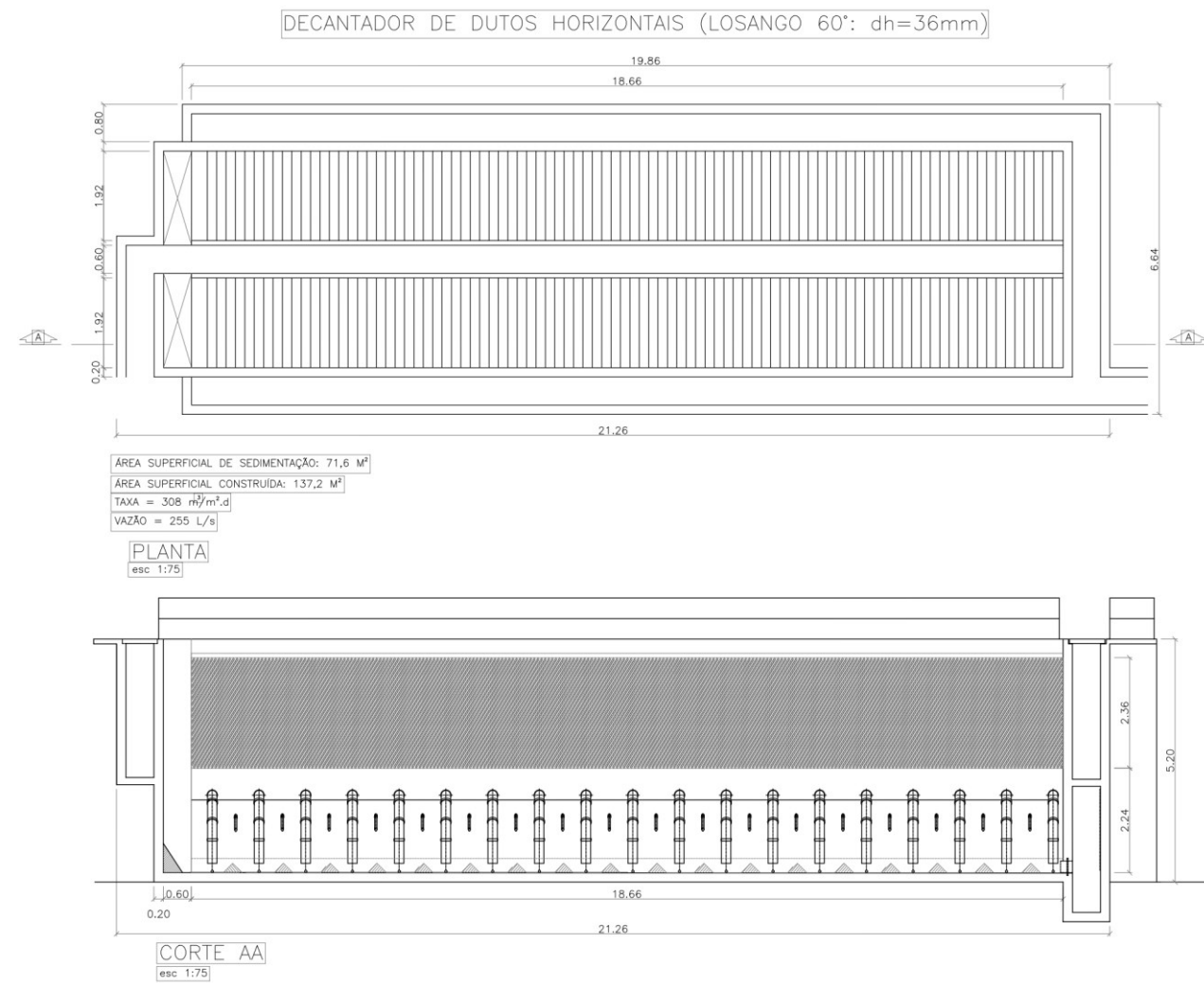
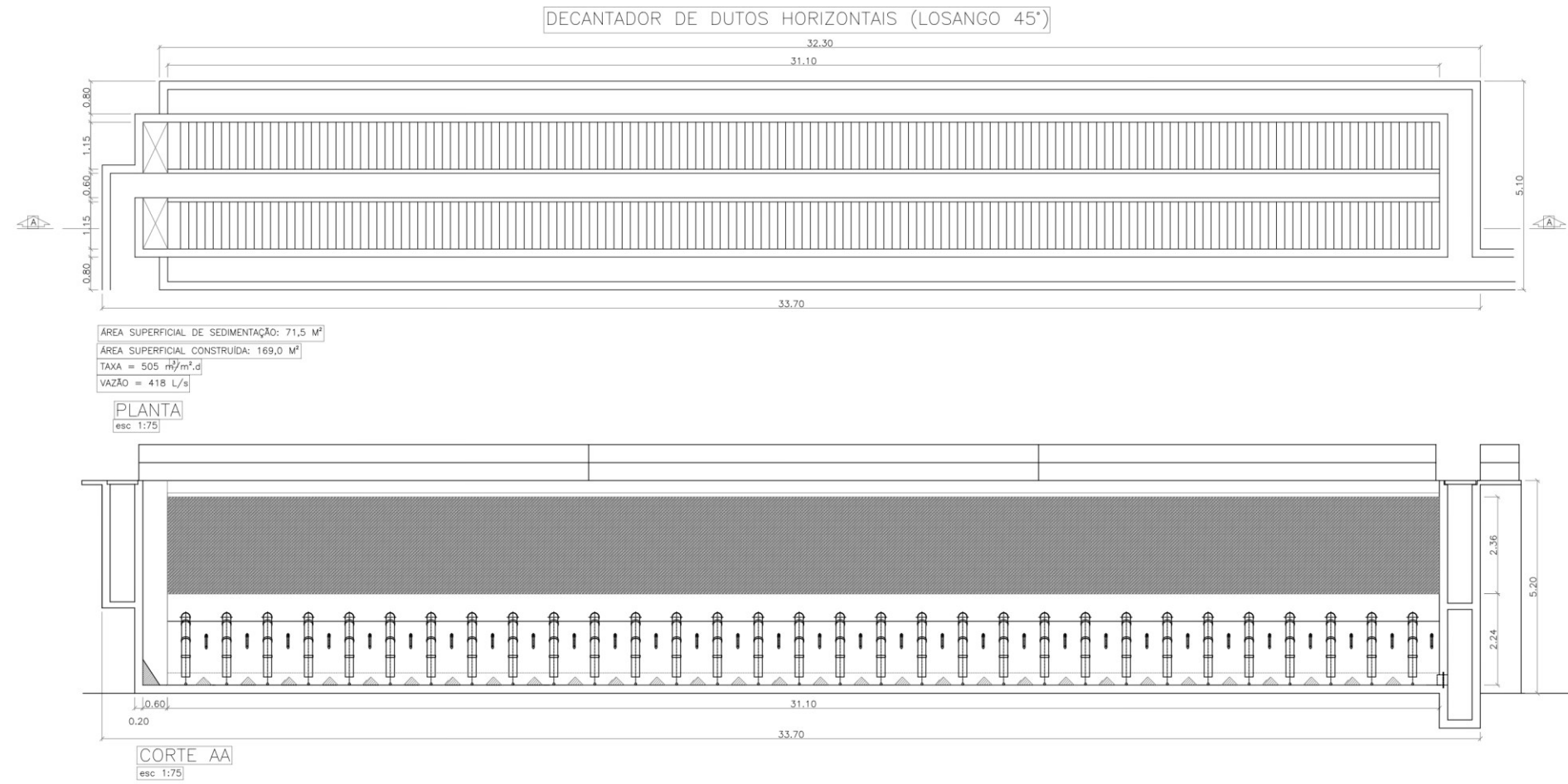


Figura 128b - Extrapolamento dos módulos de sedimentação do tipo *ML Sens* para apresentar a mesma área de sedimentação e altura final do decantador



Por meio de análise das Figuras 128.a e 128.b , notou-se que, para mesma área superficial de sedimentação ($71,5 \text{ m}^2$) e altura total do decantador (5,2 m), a vazão calculada para o decantador tipo *MLSens* foi 2,0 a 3,3 vezes superior que o de placas inclinadas, dependendo do formato de duto escolhido na confirmação interna proposta (Tabela 40).

A produtividade de água tratada foi maior no tipo *MLSens* do que no decantador de alta taxa existente, elevando consequentemente a taxa de escoamento superficial.

Tabela 40 – Comparativo dos principais parâmetros entre o decantador de alta taxa com placas inclinadas e o decantador tipo *MLSens*, ambos com mesma área superficial de sedimentação = $71,5 \text{ m}^2$.

Decantador	Elemento de sedimentação	Área superficial construída (m^2)	Vazão total do decantador (L/s)	Taxa de escoamento superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$)
alta taxa existente	Placas paralelas inclinadas a 60°	105	125	151
	Losangular- 60° * dh = 36 mm	137	255	308
tipo <i>MLSens</i> (tubular horizontal autolimpante)	Circular dh = dv = 36 mm	169	359	433
	Losangular- 60° * dv = 36 mm	169	393	474
	Losangular- 45° * dh = dv = 36 mm	169	418	505

*Ângulo externo entre a base da seção transversal do duto horizontal de sedimentação e o plano horizontal.

Os dutos de diferente formatos do decantador tipo *MLSens* foram organizados na Tabela 40 em ordem crescente de vazão e taxa de escoamento superficial. Os dutos losangulares- 45° foram os que apresentaram maior taxa de escoamento superficial, alcançando $505 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, uma taxa 3,3 vezes a do decantador existente e pelo menos 2 vezes maior do que a literatura apresenta para decantadores de alta taxa instalados em estações de tratamento de água.

Quando se fixa a altura de sedimentação do decantador, cabem menos dutos losangulares- 60° com dv = 60 mm sobrepostos em linha do que os demais dutos, com dv = 36 mm. Por isso, este foi o duto que apresentou menor vazão e taxa de escoamento superficial.

Os dutos circulares apresentaram a desvantagem da placa que os une e que facilita o deslizamento dos flocos provocar perda de espaço útil para a sedimentação. Ademais, o encaixe de um duto e outro no arranjo em si não promove um aproveitamento da área superficial de sedimentação quanto os dutos losangulares de mesma distância vertical da seção (dv).

Analisando ainda a Tabela 40, percebe-se que, para mesma área superficial de sedimentação, as áreas construídas da nova concepção de decantador (organizada com o layout construtivo deste exemplo em específico) teve um acréscimo de 32 e 64 m² em relação ao decantador existente, ou seja, 1,3 e 1,6 vezes maior, considerando os dutos losangulares-60° (dh=36mm) e o grupo dos demais dutos, respectivamente.

Por outro lado, o decantador *MLSens* apresentou um incremento mais expressivo na vazão e taxa de escoamento superficial (2,0 a 3,3 vezes), do que de área construída, compensando assim, sua utilização ao invés do decantador de placas inclinadas.

Vale ressaltar que a área construída depende do tipo de desenho do projeto do decantador, o tipo das unidades anteriores, a localização em planta das unidades, o modo de conexão entre as mesmas, as larguras dos canais, a configuração da zona de entrada e saída, entre outros fatores.

Comparando os decantadores propostos a partir da geometria dos dutos nos arranjos, observou-se que os dutos de mesma distância vertical da seção transversal ($dv = 36 \text{ mm}$) apresentaram mesmos valores para as dimensões de largura (5,1 m) e comprimento (31,1 m), além da altura, que foi fixa. Dentre esses três, os dutos losangulares foram os que exibiram maior taxa de escoamento superficial, visto que os arranjos resultam em melhor aproveitamento da área superficial; por sua vez, o losangular-45° foi o melhor (505 m³/m².d).

Se os dutos fossem apenas sobrepostos uns sobre os outros, teoricamente deveria servir a mesma quantidade de dutos com mesmo dv , quando se fixa a altura do decantador. Todavia, devido ao arranjo em que os dutos losangulares-45° se encaixam em fileiras inclinadas a 45° e os losangulares-60° inclinadas a 60°, há uma diferença de 4 linhas a mais para o primeiro tipo de duto, como pode-se conferir na Tabela 39.

Contudo o principal motivo de o duto losangular-45° apresentar taxa maior que losangular-60° de mesmo dv foi a área da seção molhada do primeiro ser maior, o que permite admitir uma vazão maior no duto. Mesmo com um número total de dutos menor (96.800 dutos *versus* 157.482 dutos), os dutos losangulares-45° apresentam maior vazão total e taxa de escoamento superficial no decantador devido à vazão individual do duto ser maior.

Confrontando os dutos com mesma distância horizontal ($dh = 36 \text{ mm}$) da seção, verificou-se que o duto losangular-60° com $dh = 36 \text{ mm}$ apresentou dimensões em planta diferentes dos demais formatos (largura x comprimento = 6,6 x 18,7 m), pois a altura vertical maior da seção transversal acarretou em um maior comprimento necessário do duto. Isso pôde ser observado nos dados da Tabela 39, enquanto os comprimentos dos dutos com $dv = 36 \text{ mm}$

foram iguais a 1,15 m; no duto losangular 60° com $d_v = 60$ mm, esse comprimento foi igual a 1,92 m.

Dentre as geometrias de dutos testadas no decantador *MLSens*, destacou-se o resultado do arranjo de dutos losangulares-45°, com vazão nominal do decantador igual a 418 L/s e taxa de escoamento superficial igual a 505 m³/m².d, comparado ao decantador existente que, para mesma área superficial e altura do decantador, possuem uma vazão nominal do decantador igual a 125 L/s e taxa de 151 m³/m².d.

5.8.3.2 *Cenário 2: fixando a vazão e a altura do decantador MLSens iguais ao do decantador de placas inclinadas*

Neste cenário, a vazão nominal e a altura total do decantador tipo *MLSens* foram iguais às do decantador de alta taxa existente ($Q = 125$ L/s e $H_{dec} = 5,20$ m), consideradas fixas para a configuração do arranjo dos dutos. A zona de lodo foi considerada idêntica para ambos os casos.

Com a vazão total do decantador fixada e com a vazão individual de cada duto calculada pela Equação 18, pôde-se calcular o número total de dutos necessários no arranjo. Além disso, sabendo a altura disponível de sedimentação, fixa em 2,37 m, foi possível calcular o número de linhas do arranjo (Equação 29). Desse modo, possuindo o número total de dutos e o número de linhas, obteve-se o número de colunas de cada arranjo através da Equação 21.

Foi realizado o arredondamento do número de linhas e colunas para valores inteiros e recalculado o número de dutos, bem como realizou-se os ajustes na largura do decantador, após deixar o arranjo com formato retangular, isto é, organizado em módulos unitários.

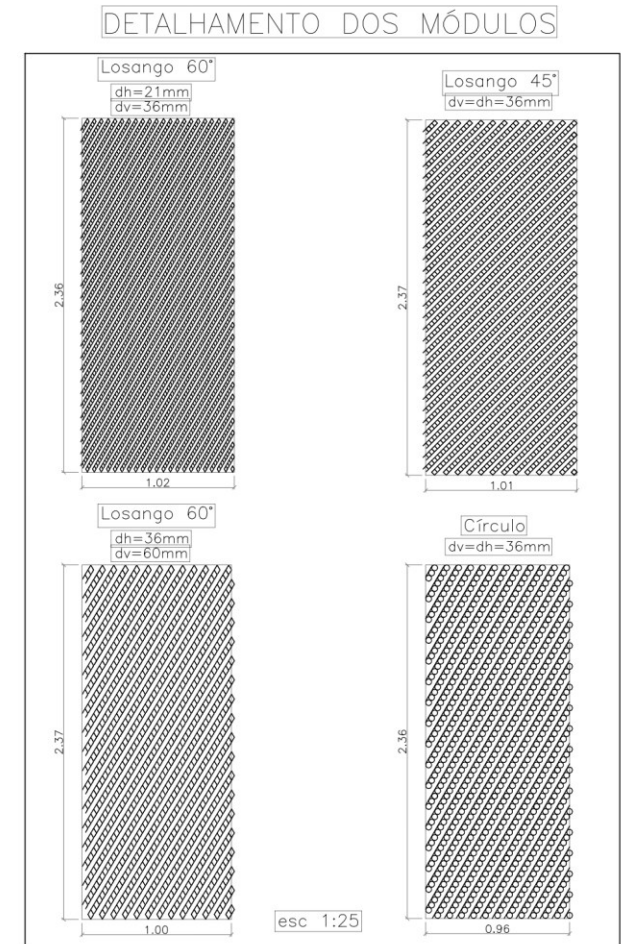
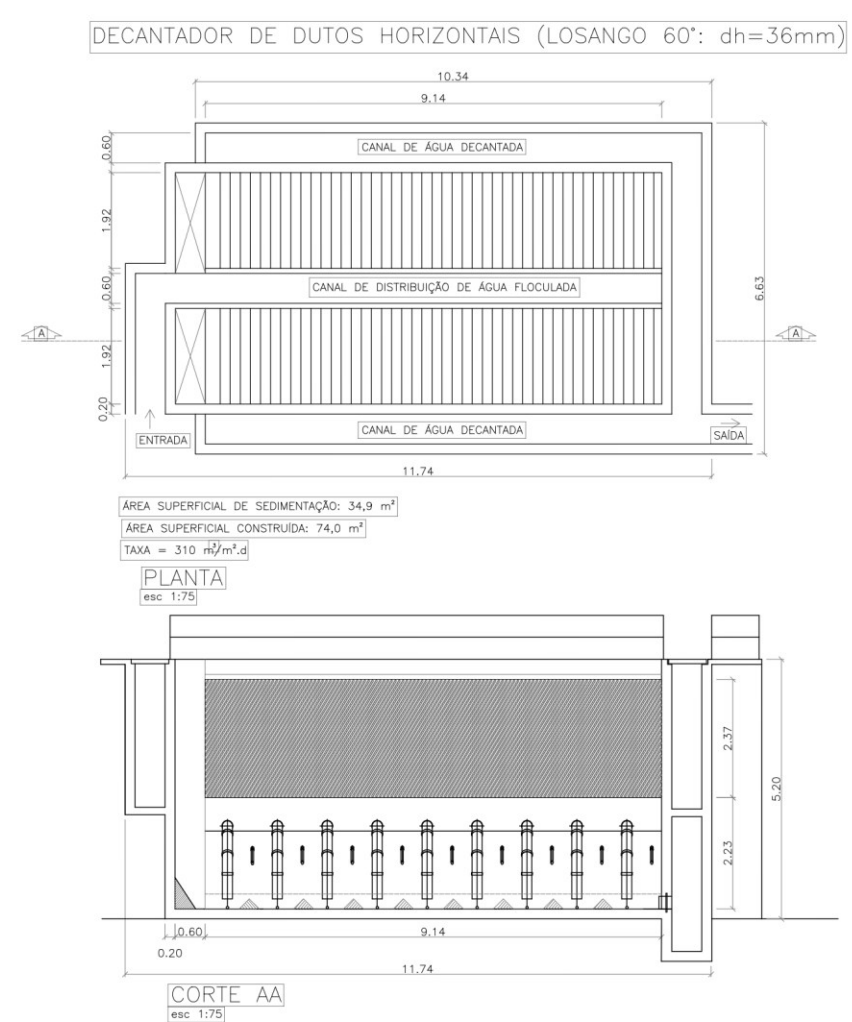
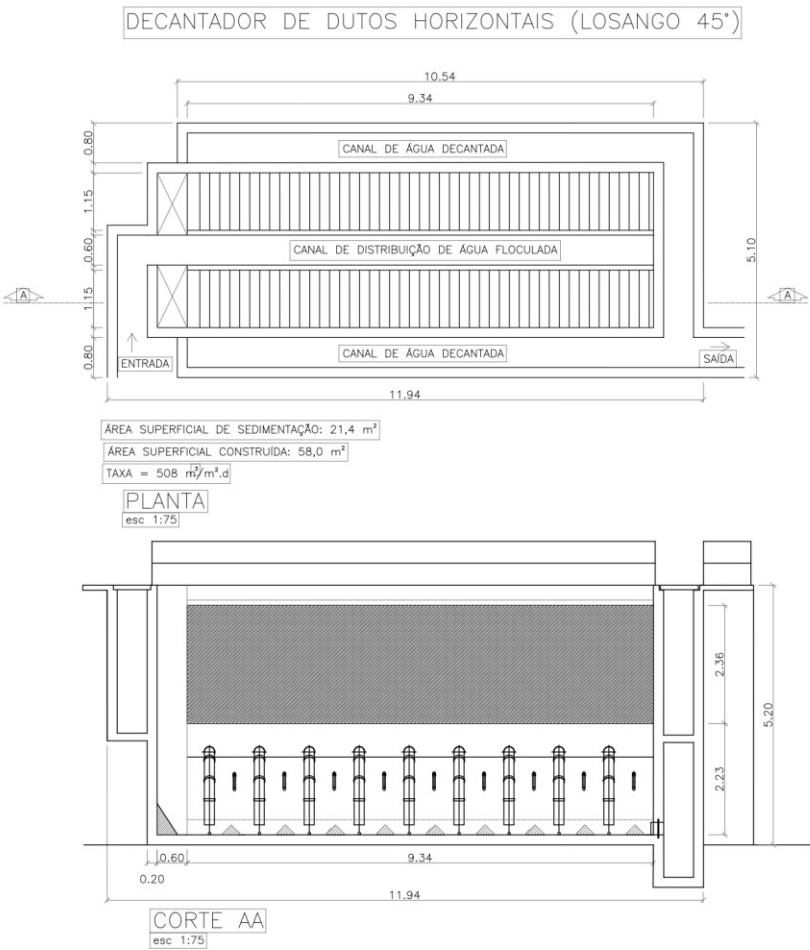
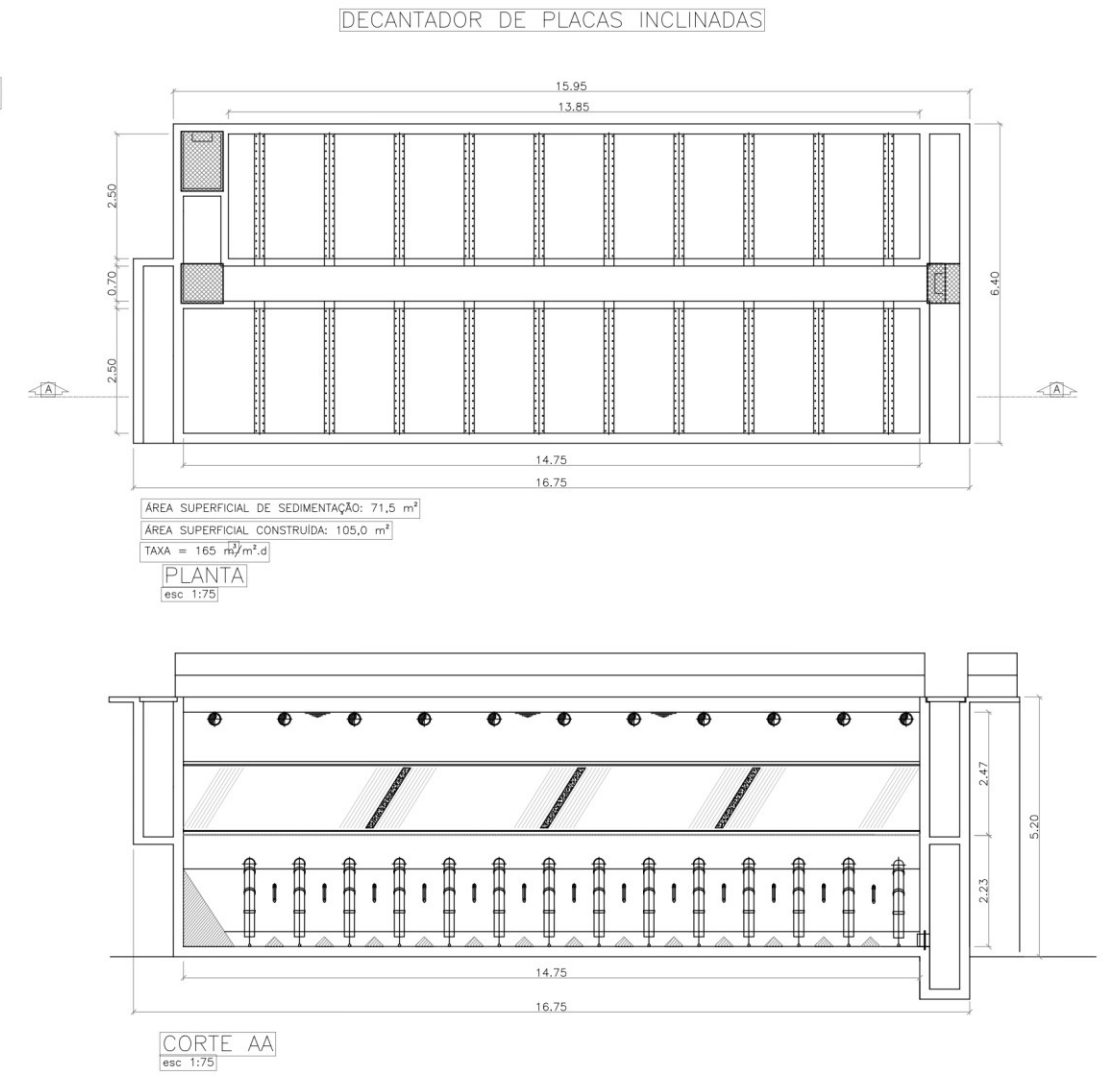
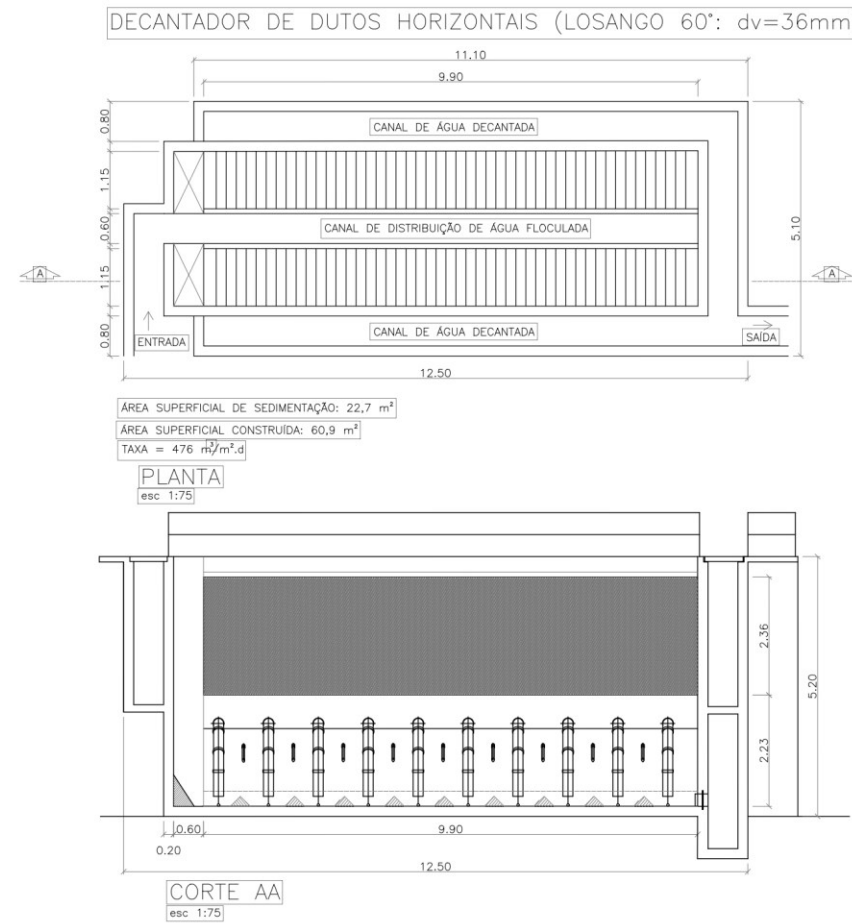
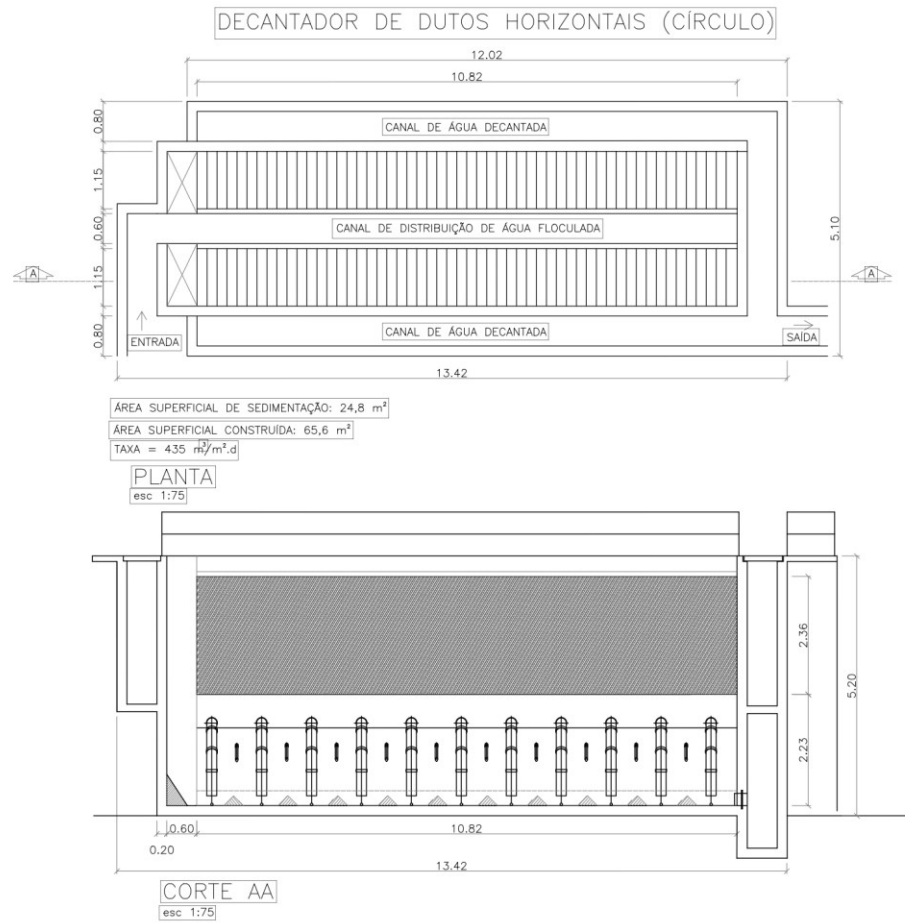
Da mesma forma que no item anterior, foi calculada a taxa de escoamento aplicada (Equação 9), mostrada na Tabela 41, a qual dispõe de todos parâmetros calculados para este exemplo de extrapolação. Os desenhos para avaliar o comprimento e largura (área superficial de sedimentação) dos decantadores e a taxa de escoamento superficial final estão apresentados na Figura 129.

Tabela 41 – Parâmetros calculados para a extrapolação do decantador *MLSens*, fixando a vazão nominal e a altura iguais do decantador de alta taxa com placas inclinadas.

Duto	Círculo	Losango 45°	Losango 60°	Losango 60°
	36 mm	36 mm	dv = 36 mm	dv = 36 mm
Diâmetro ou lado Ø (m)	0,0360	0,0255	0,0208	0,0360
Diagonal vertical dv (m)	0,0360	0,0360	0,0360	0,0600
Diagonal horizontal dh (m)	0,0360	0,0360	0,0208	0,0360
Área molhada Atub (m ²)	0,0010	0,0006	0,0004	0,0011
Velocidade de escoamento v0 (m ³ /m ² .d)	576	576	576	576
Vazão Individual Qi (m ³ /d)	0,59	0,37	0,22	0,62
Comprimento do duto dh _L (m)	1,15	1,15	1,15	1,92
Comprimento relativo	32	32	32	32
Espessura do duto e (m)	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020
Espessura da placa ep (m)	0,0020	-	-	-
Ângulo inclinação da placa / parede Θ (°)	60	45	60	60
eh da placa (m)	0,0023	-	-	-
w - placa (m)	0,0031	-	-	-
y (m)	0,0034	-	-	-
eh parede (m)	-	0,0028	0,0023	0,0023
ev parede (m)	-	0,0028	0,0040	0,0039
Espaçamento entre dutos D (m)	0,0346	0,0360	0,0208	0,0360
Dutos necessários total N _t	18421	28935	50117	17361
Altura total do decantador: H _T (m)	5,20	5,20	5,20	5,20
Altura disponível: H_{dec} (m)	2,37	2,37	2,37	2,37
Nº de linhas que cabem na altura	65,7	120,9	117,3	73,1
Nº de linhas adotado	68	121	117	73
Altura real (m)	2,36	2,37	2,36	2,37
Número de colunas necessário nc	135,4	119,6	214,2	118,9
Número de colunas adotado nc	135	120	214	119
Largura ocupada B' (m)	10,77	9,28	9,86	9,09
Valor de x, da correção	-	0,001	0,001	0,001
Correção ΔB (m)	0,053	0,058	0,035	0,057
Largura corrigida B (m)	10,82	9,34	9,90	9,14
Nº total de dutos	18360	29040	50076	17374
Vazão real (L/s)	125	125	125	125
Área total sedimentação (m²)	24,8	21,4	22,7	34,9
Taxa real (m³/m².d)	435	508	476	310

Figura 129 - Extrapolamento dos módulos de sedimentação do tipo *MLsens* para apresentar a mesma altura final do decantador.

FIXANDO A ALTURA: $H = 5,2m$



De acordo com a Figura 129 e a Tabela 41, pôde-se resumir os parâmetros principais para comparar o decantador de alta taxa com placas paralelas inclinadas e o decantador tipo *MLSens* com suas variações de dutos na Tabela 42.

Tabela 42 – Comparativo dos principais parâmetros entre o decantador de alta taxa com placas inclinadas e o decantador tipo *MLSens*, ambos com mesma vazão do decantador = 125 L/s

Decantador	Elemento de sedimentação	Área superficial construída (m ²)	Área de sedimentação (m ²)	Taxa de escoamento superficial (m ³ /m ² .d)
alta taxa existente	Placas paralelas inclinadas a 60°	105	71,5	151
	Losangular-60° * dh = 36 mm	74	34,9	310
tipo <i>MLSens</i> (tubular horizontal autolimpante)	Circular dh = dv = 36 mm	66	24,8	435
	Losangular-60° * dv = 36 mm	61	22,7	476
	Losangular-45° * dh = dv = 36 mm	58	21,4	508

*Ângulo externo entre a base da seção transversal do duto horizontal de sedimentação e o plano horizontal.

Ao analisar a Figura 129 e a Tabela 42, o primeiro aspecto que se notou diferença entre o decantador de alta taxa existente e os decantadores com inovação na conformação interna foi a área superficial. Com uma vazão nominal e altura total fixadas para todos, os decantadores propostos necessitaram de uma área superficial de sedimentação de 51 a 70% menor (ou 2,1 a 3,4 vezes menor) do que o decantador existente.

Os decantadores extrapolados, ocupando uma área construída 30 a 45% menor (ou 1,4 a 1,8 vezes menor) do que o decantador existente, foram capazes de demonstrar taxas de escoamento superficial consideravelmente superiores, em até 3,4 vezes.

Ao se atentar para as diferentes geometrias dos módulos tubulares na Figura 129, comparando os dutos de mesma distância vertical da seção transversal (dv = 36 mm), teve-se novamente os mesmos valores de comprimento dos dutos de sedimentação, porém larguras diferentes. As larguras totais dos decantadores com dutos de formato circular, losangular-60° e losangular-45° foram iguais a 13,4, 12,5 e 11,9 m, respectivamente. Já as taxas de escoamento superficial foram de 435, 476 e 508 m³/m².d, respectivamente. Desse modo, o decantador contendo os dutos no formato losangular-45° foi o que apresentou menor dimensão novamente, no caso, da largura da unidade, e o que revelou maior taxa.

Fazendo o comparativo para os decantadores com dutos de mesma distância horizontal da seção transversal (dh = 36 mm), o decantador com dutos losangulares-60° denotou maior comprimento de duto que os demais, devido à maior altura da seção, como foi supracitado. Ademais, apresentou um comprimento de 11,74 m, semelhante à do decantador

com dutos losangulares-45° (de 11,94 m). Todavia, como a altura foi fixada, se adequa um menor número de dutos losangulares-60° com $dh = 60$ mm sobrepostos em camadas que os outros, sendo necessário maior número de dutos na largura e, por isso, não apresentou tanta vantagem nas dimensões, quando confrontado aos demais dutos. Também foi o formato que exibiu menor taxa de escoamento superficial ($310 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$).

O duto que mais se destacou em relação aos demais, para o cenário 2, assim como no cenário 1, foi o losangular-45°. O decantador composto por estes dutos além de apresentar a menor largura, também foi o que apresentou menor área de sedimentação ($21,4 \text{ m}^2$) e menor área construída (58 m^2) para a maior taxa de escoamento superficial ($508 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do primeiro objetivo específico, correspondente à Fase I do experimento, utilizando o Decantador 1, concluiu-se que:

- a) Quanto à influência na eficiência de remoção de sólidos suspensos do decantador:
 - i) com uma confiabilidade de 99%, pôde-se comprovar a influência da distância vertical e do formato da seção transversal do duto. A diminuição da distância vertical da seção, mesmo que ínfima, e o uso dos dutos losangulares, ao invés de circulares, já promovem um aumento significativo da eficiência de remoção de sólidos;
 - ii) a turbidez média da água decantada foi de 1,76 uT na Etapa 1, independente do duto. Constatou-se que em 99,5% do tempo, a turbidez efluente permaneceu inferior a 5,0 uT, um valor de boa qualidade, como indicado pela literatura.
 - iii) obteve-se menores valores de turbidez efluente para o Duto 3 (formato circular menor), com 100% dos dados abaixo de 4,0 uT. Em termos de turbidez da água decantada e de eficiência de remoção de sólidos, o Duto 5 (formato losangular menor) também se destacou. Ambos apresentaram metade dos dados com eficiências entre 94 e 98%;
 - iv) os dutos 3 e 5 demonstraram uma eficiência superior em relação aos demais também para o caso da remoção de cor aparente, cujas médias foram 93,2% e 93,6%, respectivamente;
 - v) dentre os cinco dutos testados, notou-se que, quanto menor a distância vertical da seção dos dutos circulares, nitidamente menor a turbidez final (e maior a eficiência). Os dutos losangulares possuíram turbidez final similar, porém o Duto 5 foi mais eficiente.
- b) Quanto à influência na taxa de escoamento superficial máxima admissível:
 - i) quanto à influência da distância vertical e do formato da seção dos dutos na taxa, houve uma superioridade estatística referente aos dados do Duto 3, cuja taxa máxima apenas neste duto foi igual a 61 m³/m².d, apresentando uma turbidez média da água decantada de 0,68 uT;
 - ii) não foi comprovada diferença estatística ($\alpha = 1\%$) entre as taxas máximas admitidas nos dutos 2 e 5 (de formatos circular e losangular, respectivamente, com mesmas alturas da seção). Portanto, não foi possível afirmar a influência

do formato no aumento da taxa de escoamento superficial com este nível de confiança;

- iii) a turbidez da água decantada durante a Etapa 2, independente da geometria do duto de sedimentação, permaneceu 95% do tempo abaixo de 1,4 uT e mais da metade do tempo menor que 0,8 uT;
 - iv) a eficiência média de remoção de turbidez na Etapa 2 foi de $98,9\% \pm 0,1\%$, considerada elevada, de acordo com os valores apresentados na literatura;
 - v) observa-se que, mesmo regulando a taxa de escoamento superficial ao máximo na Etapa 2, não houve redução na eficiência de remoção de turbidez em relação à Etapa 1, todavia, analisando ao longo da segunda etapa, houve uma correlação inversamente proporcional entre eficiência e taxa.
- c) Quanto à influência na capacidade de autolimpeza da zona de sedimentação:
- i) a ressuspensão dos flocos não é visualizada, mesmo para aplicação de velocidades longitudinais maiores que 40 cm/min;
 - ii) considerou-se que, dentre os dutos testados, os dutos com seção transversal de formato losangular foram os que apresentaram uma autolimpeza eficaz, independente do tamanho da seção transversal;
 - iii) a inclinação inerente ao formato losangular da seção transversal dos dutos facilitou o deslizamento da maior parte dos sólidos para saírem através da abertura inferior;
 - iv) nesses dutos, ocorreu depósito menor de lodo no fundo, próximo a abertura longitudinal inferior; onde formavam-se aglomerações esparsas ao longo do comprimento;
 - v) o acúmulo de lodo no fundo dos elementos de sedimentação ocorreu principalmente nos dutos circulares, devido ao fato de não haver inclinação suficiente para os flocos deslizarem próximo à abertura longitudinal inferior;
 - vi) a duração de 2 h já era o suficiente para ocorrer obstrução parcial da seção da abertura longitudinal inferior dos dutos circulares;
 - vii) os dutos circulares podem ter seu mecanismo de autolimpeza melhorado ainda, por exemplo, aumentando a largura da abertura longitudinal inferior e realizando um estudo da largura máxima que não prejudique o fluxo de água;
 - viii) estima-se que se os dutos circulares (iguais aos utilizados neste estudo) fossem utilizados em um tratamento contínuo funcionando 24h/d, em algum

momento, haveria a necessidade de parada da unidade para desobstrução da seção;

- ix) verificou-se que a maioria dos flocos sedimentou no primeiro um terço do comprimento total da zona de sedimentação, possibilitando o aumento da taxa de escoamento superficial.

A partir do segundo objetivo específico, correspondente à Fase II do experimento, utilizando o Decantador 2, concluiu-se que:

a) Quanto à eficiência de remoção de sólidos do arranjo:

- i) a turbidez média do efluente do decantador foi igual a $1,71 \pm 0,12$ uT. A eficiência média de remoção deste parâmetro foi de $95,2\% \pm 0,4\%$. Ambos os valores foram considerados adequados, de acordo com a literatura;
- ii) a cor aparente média do efluente foi igual a 26 ± 1 uH, havendo uma eficiência média de remoção deste parâmetro equivalente a $92,1\% \pm 0,7\%$, também considerada satisfatória;
- iii) mesmo com valores não tão elevados de água floculada (maioria entre 30 e 40 uT), o Decantador 2 apresentou bons resultados de remoção de sólidos. Provavelmente, se recebesse afluente com maior concentração de sólidos, apresentaria valores maiores de eficiência;
- iv) em 98,5% do tempo, a eficiência de remoção de turbidez foi maior do que 90%. Também, com uma frequência de cerca de 67%, obteve-se dados superiores à 95% de eficiência.

b) Quanto à eficácia da autolimpeza dos dutos na zona de sedimentação:

- i) como a lateral do duto losangular forma um ângulo de 60° com a horizontal, notou-se que o modo íngreme em que as paredes se afinam em direção à abertura longitudinal inferior, propicia o deslizamento dos flocos e, portanto, a autolimpeza dos dutos de sedimentação;
- ii) o acúmulo de lodo foi apenas de forma esparsa, com alguns aglomerados de pouco volume ao longo do comprimento dos dutos;
- iii) os flocos deslizaram pela superfície externa dos dutos (rampa) sem haver qualquer acúmulo na mesma;
- iv) após saírem pela abertura, os flocos transitaram entre os perfis de dutos, sedimentando até a zona de lodo sem apresentar maiores turbulências ou se desviarem por correntes de fluxo.

A partir do terceiro objetivo específico, correspondente à Fase III do experimento, realizando uma metodologia para extrapolação, concluiu-se que:

- a) Quanto à extrapolação dos decantadores em escala piloto:
 - i) os Decantadores 1 e 2, que em escala piloto exibiram uma taxa de escoamento superficial de 10,3 e 15,6 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, respectivamente; na extrapolação, alcançaram uma taxa elevada de 240 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ com 23 e 15 camadas de dutos sobrepostas, respectivamente. O que resultou em uma profundidade total da zona de sedimentação de 1,68 e 1,82 m, respectivamente.
- b) Quanto ao dimensionamento do arranjo de dutos para layouts em escala real:
 - i) foram determinados procedimento de cálculo para dimensionamento dos parâmetros do decantador em escala real, para dutos com formato losangular e circular;
 - ii) alguns parâmetros considerados para elaboração do dimensionamento foram: número de dutos em linha (nl) e em coluna (nc), comprimento dos dutos (dh_L ou L), ângulo de inclinação dos dutos no arranjo (θ); distância horizontal da seção do duto (dh); distância vertical da seção do duto (dv); largura do decantador (B); altura da zona de sedimentação (H_{sed}); e espessura da parede do duto (e).
- c) Quanto à realização de um exemplo-tipo, comparando com um decantador de alta taxa existente:
 - i) os decantadores extrapolados possuem a vantagem de não necessitar de calhas coletora de água decantada, aproveitando melhor a altura do decantador;
 - ii) no cenário 1 (fixando área superficial de sedimentação e a altura do decantador), os decantadores tipo *MLSens* apresentaram uma taxa de escoamento superficial de 2 a 3,3 vezes superior ao decantador de alta taxa existente exemplificado (151 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$).
 - iii) ainda no cenário 1, os módulos tubulares horizontais que mais se destacaram possuíam formato losangular-45°, que permitiu exibir uma taxa de escoamento superficial de 505 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Embora tenha apresentado área construída maior que o decantador existente, os ganhos em produtividade, com maior vazão e taxa de escoamento superficial, compensam.

- iv) no cenário 2 (fixando a altura total do decantador), os decantadores propostos necessitaram de uma área superficial de sedimentação de 51 a 70% menor que o existente.
- v) ainda no cenário 2, os módulos tubulares horizontais que mais se destacaram possuíam formato losangular-45°. Além de apresentar a menor largura, também foi o que apresentou menor área de sedimentação (21,4 m²) e menor área construída (58 m²) para a maior taxa de escoamento superficial (508 m³/m².d), 3,3 vezes maior que o existente mostrado no exemplo.

7 CONCLUSÕES

A partir da inovação desenvolvida neste trabalho, conclui-se os seguintes pontos em relação à conformação interna dos decantadores tubulares horizontais:

- a) propiciou unidades de decantação eficientes, alcançando remoções médias de turbidez e cor aparente de 98,9% e 97,8%, respectivamente. Tais unidades foram capazes de apresentar turbidez da água decantada com valores na maior parte do tempo menores do que 2,0 uT;
- b) a adoção de dutos horizontais com abertura longitudinal inferior contendo seções transversais de menores distâncias verticais auxilia no aumento da eficiência de remoção de sólidos e permite aplicar maiores taxas de escoamento superficial ($\alpha = 1\%$);
- c) o formato losangular da sessão transversal dos dutos propiciou maior eficiência de remoção de sólidos do que o formato circular ($\alpha = 1\%$), embora ambos tenham apresentado turbidez da água decantada similar, com 75% do tempo menor que 2,0 uT;
- d) a abertura longitudinal inferior permitiu a autolimpeza dos dutos, onde os flocos que saíam através da mesma, não retornavam mais para o interior do duto de sedimentação;
- e) a partir das observações, sugere-se a utilização de dutos com o formato da seção transversal losangular, para obter maior capacidade de autolimpeza na zona de sedimentação;
- f) o arranjo de dutos criado permite o que os flocos transitem por entre os perfis e sedimentem até a zona de lodo;
- g) na extrapolação dessa conformação interna, os decantadores se mostraram mais produtivos e compactos. As unidades extrapoladas puderam apresentar uma taxa de escoamento superficial até 3,4 vezes maior, quando comparados para mesma situação que um decantador de alta taxa existente utilizado como exemplo, alcançando uma taxa de 508 m³/m².d.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há muito o que ser estudado acerca da nova concepção sugerida neste trabalho. Devem-se ampliar os horizontes de conhecimento a respeito do funcionamento, dimensionamento, aspectos construtivos, modo de operação, entre outros fatores, que auxiliem a concretização do decantador em escala real.

Alguns itens para nortear estudos futuros foram elencados a seguir:

- a) dimensionar um decantador *MLSens* com comprimento relativo (L_r) menor do que o utilizado neste trabalho, para desafiar a capacidade de remoção do decantador e aproveitar melhor o potencial da tecnologia, sem adoções de parâmetros de modo conservador. Ou seja, testar a eficiência que apresentaria para um L_r menor;
- b) estudar o escoamento no trecho de transição do fluxo na entrada dos dutos com essa abertura longitudinal inferior;
- c) estudar modelos matemáticos que possam identificar a influência da abertura longitudinal inferior no fluxo de água no interior do duto;
- d) testar diferentes larguras da abertura longitudinal inferior, mantendo o mesmo formato e tamanho de seção do duto;
- e) buscar uma relação ótima entre largura da abertura longitudinal inferior e o tamanho da seção do duto; seja esse tamanho relacionado à distância horizontal ou vertical para o floco percorrer, ou mesmo relacionado à área da seção;
- f) determinar o coeficiente de atrito entre o material a executar os dutos e o lodo, com a determinação do ângulo necessário para que os flocos deslizem sobre a superfície interna e externa dos dutos;
- g) criar layouts de arranjos de dutos horizontais com a abertura longitudinal inferior utilizando outros formatos de seção;
- h) testar a eficiência de arranjos de dutos mais próximos da escala real, isto é, com maior número de dutos em linha, para verificar se ainda é possibilitado o livre trânsito dos flocos até a zona de lodo;
- i) testar materiais para elaborar um módulo unitário do arranjo de dutos com abertura longitudinal inferior;
- j) testar o tratamento para outras qualidades de água bruta;
- k) operar em paralelo e mesmas condições experimentais os decantadores do tipo: *MLSens*; convencional de fluxo horizontal; e de alta taxa com placas paralelas ou módulos inclinados; a fim de comparar a melhor tecnologia;

- 1) fazer outras análises, como sólidos totais dissolvidos e absorvência da água decantada, sólidos totais e sólidos sedimentáveis do lodo gerado quando tiver sido identificado uma situação operacional otimizada em uma escala mais próxima à real.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Pedro (SP), v. 18, n. 2, p. 115-122, abr/jun 2013.

ADELMAN, M. J.; HURST, M. W.; WEBER-SHIRK, M. L.; CABRITO, T. S.; SOMOGYI, C.; LION, L. W. Floc Roll-Up and Its Implications for the Spacing of Inclined Settling Devices. **Environmental Engineering Science**, [s. l.], v.30, n. 6, p. 302-310, jun. 2013. DOI: 10.1089/ees.2012.0295.

ALCÓCER, N. E.; DI BERNARDO, L. Influência da geometria do duto e das características do escoamento na decantação de alta taxa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, set. 2001, João Pessoa, PB. **Trabalhos Técnicos** [...]. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2001. I-007. p. 1-7.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. L. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal of American Water Works Association**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 210-216, abr. 1982.

APHA (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23th ed. Washington.

ARANTES, Camila Clementina. **Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2010.

ARBOLEDA, Jorge Valencia. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. Tomo 1. 3. ed. Bogotá: McGraw-Hill/Interamericana, 2000.

ASRAFUZZAMAN, M.; FAKHRUDDIN, A. N. M.; HOSSAI, A. Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *International Scholarly Research Networ. ISRN Microbiology*. [s. l.], v. 2011, p. 1-6, 2011. DOI: 10.5402/2011/632189. ID: 632189.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018. 68 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6024**: informação e documentação – numeração progressiva das seções de um documento: apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6028**: informação e documentação – resumo – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação – citações em documentos – apresentação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público: procedimento. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 15 p.

AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Calidade Y Tratamiento del Agua**. Manual de suministros de agua comunitaria. 5. ed. Madrid: McGraw-Hill Professional/Interamericana de España, 2002.

AZEVEDO NETTO, J. M. Achievements in Water Supply Treatment and Technology in South America. **Journal of American Water Works Association**, [s. l.], v. 68, n. 6, p. 270-271, jun. 1976. New Treatment Techniques. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41268457>. Acesso em: 06 fev. 2019.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano; ALVAREZ, Guillermo Acosta. **Manual de Hidráulica**. 7. ed. atualizada e ampliada. São Paulo: Edgard Blucher, 1985. v.1, 335 p.

BANDROWSKI, J.; HEHLMANN, J.; MERTA, H; ZIOLO, J. Studies of sedimentation in settlers with packing. **Chemical Engineering And Processing**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 219-229, jun. 1997. Process Intensification. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0255-2701\(96\)04190-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0255-2701(96)04190-6). Acesso em: 19 jan. 2019.

BIOSIS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EIRELI. **Catálogo de serviços e produtos**. Disponível em: www.biosis.eco.br. Acesso em: 18 dez. 2018.

BHOLE, A. G. Field performance of modified tube settler unit. **Journal of Indian Water Works Association**, v. 28, n. 1, mar. 1996.

CAMP, T. R. Sedimentation and the Design of Settling Tanks. **Transactions of the American Society of Civil Engineers – ASCE**, [s. l.], v. III, 1946.

CARISSIMI, Elvis. **Desenvolvimento do reator gerador de flocos (RGF): Aspectos teóricos e aplicações no tratamento e reuso de águas e efluentes**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CAVAZZANA, Tarso Luís. **Ampliação de escala de um Floco-Decantador de Manta de Lodo no tratamento de água de abastecimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. 2. ed. rev. São Paulo: CETESB, 1976. 2 v.il.

CLARK, S. E.; ROENNING, C. D.; ELLIGSON, J. C.; MIKULA, J. B. Inclined plate settlers to treat storm-water solids. **Journal of Environmental Engineering - ASCE**, [s. l.], v. 135, n. 8, p. 621-626, ago. 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000018.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 357/2005, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CONSTANTINO, Arcioni Ferrari; YAMAMURA, Victor Docê. Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC. *In*: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA, 2, 2009. **Anais [...]**. Maringá/PR: Universidade Estadual de Maringá, 2009. p. 15-17. ISSN 2175-3695.

COSTA, Erick Gustavo Correa da. **Estudo comparativo de clarificação de água bruta submetida a tratamento com cloreto de polialumínio e sulfato de alumínio**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química) – Fundação Educacional do Município de Assis, Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, Campus “José Santilli Sobrinho”, Assis, 2011. 24 p.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSEL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G.; BORCHARDT, J. H. **MWH’s Water Treatment**. Principles and Design. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. 1906 p.

CULP, Gordon. The birth of tube and plate settlers: Concept to reality, 1904-1965. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v. 106, n. 12, p. 39-43, dez. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0161>. Acesso em: 09 jan. 2019.

CULP, Gordon L.; HANSEN, Sigurd P.; RICHARDSON, Gordon. High-Rate Sedimentation in Water Treatment Works. **Journal of American Water Works Association**, Cleveland, v. 60, n. 6, p. 681-698, jun. 1968. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1968.tb03594.x>. Acesso em: 12 jan. 2019.

CUNHA, Francisco Humberto Rodrigues da. **Estudo do comportamento hidráulico e da eficiência na decantação de alta taxa**. 1989. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989. DOI: 10.11606/D.18.2019.tde-02102019-173245.

DALTTAX. Catálogo do Sistema de decantação da DALTTAX. Disponível em: <http://www.dalntax.com.br/>. Acesso em: 12 jan. 2019.

DEMIR, Ahmet. Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks. **Water Research**, Grã Bretanha, v. 29, n. 2, p. 611-616, 1995. Editora: Elsevier Science Ltd. DOU: 0043-1354/95.

DI BERNARDO, Luiz. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v. 2. Rio de Janeiro: ABES, 1993. 481 p.

DI BERNARDO, Luiz (coord.). **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Rede Cooperativa de Pesquisas**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS; Angela Di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe Editora, 2017. 1246 p.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO; A.; CENTURIONE, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RiMa Editora, 2002.

FADEL, Ahmed Ashry. **Model for horizontal tube settlers**. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Major Department of Sanitary Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa, 1985. Retrospective Theses and Dissertations. Paper 12059.

FARAJI, A., ASADOLLAFARDI, G., SHEVIDI, A. A pilot study for the application of one- and two-stage tube settlers as a secondary clarifier for wastewater treatment. **International Journal of Civil Engineering Environment**. Transaction A: Civil Engineering, [s. l.], v. 11, n. 4, dez. 2013.

FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. **Tratamento de Água: Concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 463 p.

FRANCO, Monalisa. **Uso de Coagulante Extraído de Sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

GURJAR, A.; BHORKAR, M.; BHOLE, A. G.; BAITULE, P. Performance Study of Tube Settlers Module. **International Journal of Engineering Research and Applications**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 52-55, mar. 2017. DOI: 10.9790/9622-0703065255. Disponível em: https://www.ijera.com/papers/Vol7_issue3/Part-6/J0703065255.pdf. Acesso em: 09 jan. 2019.

HANSEN, Sigurd P.; CULP, Gordon L. Applying Shallow Depth Sedimentation Theory. **Journal of American Water Works Association**, [s. l.], v. 59, n. 9, p.1134-1148, set. 1967. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41265168>. Acesso em: 16 jan. 2019.

HAZEN, A. On sedimentation. **Transactions of the American Society of Civil Engineers – ASCE**, [s. l.], v. 53, 1904. p. 45.

HASHIMOTO, E. H.; POZZAN, B.; PEREIRA, M. P.; ROSA, J. L. DA; CONCEIÇÃO, P. S. DA. Aplicação de Policloreto de Alumínio e Sulfato de Alumínio como Coagulantes para Remoção de *Microcystis aeruginosa*. In: **CONGRESSO ABES/FEIRA NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE**, out. 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental/Associação dos Engenheiros da Sabesp, 2017. I-343. p. 1-12.

IMAM, E.; MCCORQUADALE, J. A.; ASCE, A. M.; ASCE, J. K. B. M. Numerical Modeling of Sedimentation Tanks. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 109, n. 12, p. 1740-1754, dez. 1983. ISSN 0733-9429/83/0012-1740.

LEME, Francilio Paes. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. São Paulo: CETESB, 1979. 424 p. i.

LEUNG, Woon Fong. Lamella and tube settlers. 2. Flow stability. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design And Development**, Massachusetts, v. 22, n. 1, p.68-73, jan. 1983. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/i200020a012>. Acesso em: 15 jan. 2019.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água/Marcelo Libânio**. 3 ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. 494 p.

LUNA, F. D. T.; SILVA, A. G.; FUKUMASU, N. K.; BUZAN O.; GOUVEIA J. H. A.; MORAES JR. D.; YANAGIHARA J. I.; VIANNA JR. A. S. Fluid dynamics in continuous settler. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 362, n. 2019, p. 712-720. Elsevier. 2019. 1385-8947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.088>. Acesso em: 16 jan. 2020.

MATSUMOTO, T.; GUILHERME, C. M. Comparação entre sistema convencional e decanto-floculador de manta de lodo associado ao decantador de alta taxa no tratamento de água de abastecimento utilizando polieletrólito catiônico como coagulante. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, set. 2001, João Pessoa, PB. **Trabalhos Técnicos** [...]. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2001. I-079. p. 1-5.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill Companies. Inc., 2003. 1819 p. ISBN: 9788580555240.

MORRILL, Arthur B.; DEAN, John B.; ORTON, James W.; ELLMS, J. W. Sedimentation Basin Research and Design. **Journal of American Water Works Association**. Detroit, v. 24, n. 9, p. 1442-1463. set. 1932.

NDABIGENGESERE, Anselme; NARASIAH, K. Subba; TALBOT, Brian G. Activate agentes and mechanism of coagulation of turbid waters using moringa oleifera. **Water Research**, Grã Bretanha, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995. Editora: Elsevier Science Ltd. DOU: 0043-1354/95.

NORDIC WATER. **Lamella Settlers – optimal sedimentation on a minimal footprint**. Catálogo: S1301 - En – 1506, 2016. Disponível em: https://www.nordicwater.com/wp-content/uploads/2016/04/S1301_Lamella_EN_web.compressed.pdf. Acesso em: 03 mar. 2019.

OLIVEIRA, Daniel Cobucci de; BASTOS, Rafael K. X.; PIMENTA, João Francisco de Paula; BORGES, Nayara Batista; FREITAS, Adiéilton Galvão de. Avaliação de desempenho de uma unidade de decantação convencional: levantamento dos parâmetros hidráulicos e sua influência na qualidade da água decantada. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [s. l.], v.1, n. 3. p. 1-8, 2007. ISSN: 0718-378X.

OLIVEIRA, Danieli Soares de. **Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de flocladores tubulares helicoidais**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sustainable Development Goal 6: Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation**. New York: United Nations Publications, 2018. ISBN: 978-92-1-101370-2. Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19901SDG6_SR2018_web_3.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

PAIVA, L. B. DE; MORALES, A. R.; DIAZ, F. R. V. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. **Revista Cerâmica**, [s. l.], v. 54, p. 213-226, 2008.

PAN, Jill Ruhsing; HUANG, Chihpin; CHEN, Shuchuan; CHUNG, Ying-Chien. Evaluation of a modified chitosan biopolymer for coagulation of colloidal particles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 147, p. 359-364, 1999. Editora: Elsevier Science B.V. 1999. PII S0927-7757(98)00588-3.

PATERNIANI, José E. S.; MANTOVANI, Marcia C.; SANT'ANNA, Márcia R. Uso de sementes de *Moringa oleífera* para tratamento de águas superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, UAEEA/UFCG, Campina Grande/PB, v. 13, n. 6, p. 765-771, 2009.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PELISSARI, L. M. T. **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do floclador tubular helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PIVELI, Roque Passos; KATO, Mário Takayuki. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. Condição Novo. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 285 p.

REED, S. C.; BUZZELL, T.; BUDA, S. A floating settler for low cost clarification. **Environmental Science Research**, Baltimore, v. 2, Pollution: Engineering and Scientific Solutions, p. 387-397. 1973.

RICHTER, Carlos A.; AZEVEDO NETTO, José M. de. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991. 332 p.

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

RICHTER, C. A.; SCHUCHARDT, W. Projeto racional de decantadores. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15, 17 a 22 set. 1989. **Anais [...]**. Belém/PA: ABES, v. 2, 1989. p. 523-551.

SALEM, A. I.; OKOTH, G.; THOMING, J. An approach to improve the separation of solid – liquid suspensions in inclined plate settlers: CFD simulation and experimental validation. **Water Research**, [s. l.], v. 45, p. 3541-3549, 2011.

SARKAR, S.; KAMILYA, D.; MAL, B. C. Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste. **Water Research**, West Bengal, India, v. 41, n. 5, p. 993-1000, mar. 2007. Editora: Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.015>. Acesso em: 11 jan. 2019.

ŠCIBAN, Marina; KLAŠNJA, Mile; ANTOV, Mirjana; ŠKRBIĆ, Biljana. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 100, 2009. p. 6639-6643. Editora: Elsevier . DOI: 10.1016/j.biortech.2009.06.047.

SHEVIDI, A.; AZIMI, A. A.; NABI-BBIDHENDI, G.; FAZELI, M; ASADOLLAFARDI, G. Application of multi-stage inclined tube settlers for water turbidity removal. **Water and Wastewater**, [s. l.], v. 1, p. 12-22, jan. 2011.

SILVA, A. R. V.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 3.2, p. 26-35, 2008. ISSN: 1809-8797. Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br/revista. Acesso em: 15 ago. 2018.

SILVA, J. W. P. DA; TORREZAO, M. E. **Estudo sobre a utilização do policloreto de alumínio para a garantia da qualidade das águas de processo no setor sucroalcooleiro**. Uberaba/MG: FAZU, 2011. 12 p. (Cadernos de Pós-Graduação da Fazu, v. 2).

SILVA, Raphaela Cunha da. **Avaliação da Influência da geometria e Dinâmica do escoamento de Floculadores Tubulares Helicoidais na Redução de Turbidez, utilizando Modelagem Física**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

SOARES, C. A.; SCHULZ, H. E.; ROMA, W. N. L.; DI BERNARDO, L. Sedimentação de partículas discretas no trecho de transição em dutos de seção quadrada e retangular usados na decantação de alta taxa. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], ano 2, n. 1, p. 190-197, jan./mar. 1997.

SOBRAL, Juliano. **Projeto, instalação e avaliação de decantador lamelar em contracorrente para clarificação de efluente de indústria metalúrgica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Mestrado em Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2013.

SOUZA, M. G. Estudo do comportamento hidráulico e hidrodinâmico de floculadores hidráulicos de escoamento horizontal. 2005. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SPARROW, E. M.; HIXON, C. W.; SHAVIT, G.. Experiments on Laminar Flow Development in Rectangular Ducts. **Journal Of Basic Engineering**, [s. l.], v. 89, n. 1, p. 116-123, mar. 1967. ASME International. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3609536>. Acesso em: 22 jan. 2019.

TARPAGKOU, Roza; PANTOKRATORAS, Asterios. The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment – A computational fluid dynamic study. **Powder Technology**, Xanthi, Grécia, v. 268, p. 139-149, dez. 2014. Editora: Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.030>. Acesso em: 13 jan. 2019.

VIANNA, Marcos R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. Belo Horizonte: Imprimatur, 2002. 576 p.

VIGNESWARAN, S.; SETIADI, T. Flocculation study on spiral flocculator. **Water, Air and Soil Pollution**. [s. l.], v. 29, n. 2, p. 165-188, 1985.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996, 211 p.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Volume 1 – Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005, 243 p.

WEISS, Gebhard. Innovative use of lamella clarifiers for central stormwater treatment in separate sewer systems. **Water Science & Technology**, [s. l.], v. 69, n. 8, 2014. p. 1606-1611. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/5f0a/71b90ac765615d2a1e126a76e88904ac7e78.pdf?_ga=2.215685719.1559721533.1578403167-1932166140.1578403167. Acesso em: 08 jan. 2020.

WESTECH. **Catálogo do produto Aquarius and Water Boy Package Water Treatment Plants, 2014**. Disponível em: <http://www.westech-inc.com/en-usa/products/package-water-treatment-plant-water-boy>. Acesso em: 01 fev. 2019.

WILLIS, Roderick M. Tubular settlers – A technical review. **Journal of American Water Works Association**. Water Technology/Quality, [s. l.], v. 70, n. 6, jun. 1978. p. 331-335. DOI: 0003-150X/78/0600-0331.

YAO, K. M. Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 42, n. 2, Part I, p. 218-228, fev. 1970.

YAO, K. M. **Sedimentadores de Alta Rata**. Boston: Camp Dresser & McKee International, 1973.

YAO, K. M. Column Settling Test and Tube Settling. **Journal of American Water Works Association**, v. 71, n. 2, Leak Detection, p. 109-112, fev. 1979.

APÊNDICE A – ÁGUA BRUTA SINTÉTICA UTILIZADA NA LITERATURA

O Quadro 5 apresenta um compilado de trabalhos da literatura, relacionados ao tratamento de água, com as informações do tipo de argila utilizada para fornecer turbidez à água e o valor adotado para este parâmetro.

Quadro 5 – Valores de turbidez em águas sintéticas preparadas em outros estudos.

Autor, ano e local	Estudo	Argila	Turbidez (uT)
Šciban et al. (2009) Sérvia	<i>Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn</i>	Caulinita	17,5; 35; 70
Ndabigengesere; Narasiah; Talbot, (1995) Canadá	<i>Active Agents and Mechanism of Coagulation of Turbid water using Moringa oleifera.</i>	Caulinita	105
Adelman et al. (2013) Nova York	<i>Floc Roll-Up and Its Implications for the Spacing of Inclined Settling Devices</i>	Caulinita	100
Pavanelli (2001) São Carlos, Brasil	Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.	Caulinita	100
Pan; Huang; Chen; Chung (1999) Taiwan	<i>Evaluation of a modified chitosan bio-polymer for coagulation of colloidal particles.</i>	Bentonita, caulinita e NaClO ₄	90
Pelissari (2006) Vitória (ES), Brasil	Influência de parâmetros de projeto no desempenho do Floculador Tubular Helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento.	Bentonita	50
Silva (2007) Vitória (ES), Brasil	Avaliação da influência da geometria e dinâmica do escoamento de Floculadores Tubulares Helicoidais na redução de turbidez, utilizando modelagem física.	Bentonita	50
Oliveira (2008) Vitória (ES), Brasil	Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de Floculadores Tubulares Helicoidais.	Bentonita	50
Paterniani; Mantovani; Sant'Anna (2009) Campina Grande (PB), Brasil	Uso de sementes de <i>Moringa oleifera</i> para tratamento de águas superficiais.	Bentonita	50 e 100
Franco (2010) Campinas (SP), Brasil	Uso de coagulante extraído de sementes de <i>Moringa oleifera</i> como auxiliar no tratamento de água por FiME.	Bentonita	100
Arantes (2010) Campinas (SP), Brasil	Utilização de coagulantes naturais à base de sementes de <i>Moringa oleifera</i> e tanino como auxiliares da filtração em mantas não tecidas.	Bentonita	105
Asrafuzzaman; Fakhruddin; Hossai (2011) Bangladesh	<i>Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants</i>	Material argiloso	25; 50; 100

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – MODO DE PREPARO DA ÁGUA BRUTA SINTÉTICA

Pode-se resumir o modo de preparo da água bruta sintética nos seguintes passos:

- 1) acrescentar uma quantidade de erva-mate tostada a granel à água de torneira fervente (com uma proporção de aproximadamente 1,25 g/L);
- 2) agitar manualmente e deixar a mistura agir por pelo menos 2 horas;
- 3) homogeneizar novamente todo o conteúdo;
- 4) peneirar a mistura (abertura 0,2 mm), removendo as partículas grosseiras (talos e folhas da erva-mate);
- 5) o passante será a infusão (solução de cor acentuada);
- 6) medir a cor verdadeira da infusão e calcular volume necessário a se adicionar na quantidade final de água sintética, para que a cor verdadeira fique cerca de 55 uH;
- 7) encher a caixa d'água de 1000 L com água da torneira;
- 8) colocar uma quantidade de bentonita na caixa d'água que mantenha a proporção de 0,4 g/L (para uma turbidez final de 120 uT);
- 9) misturar a água da torneira, bentonita e infusão de erva mate durante 15 minutos acionando a bomba centrífuga de recirculação da caixa d'água;
- 10) deixar a mistura agir em repouso durante pelo menos 24 horas;
- 11) após esse período, homogeneizar novamente todo o conteúdo, ligando a bomba de recirculação, assim, a água sintética está pronta para iniciar o funcionamento do sistema.

APÊNDICE C – PARÂMETROS UTILIZADOS NAS EQUAÇÕES

A Tabela 43 contém os valores dos parâmetros utilizados para os cálculos de gradiente de velocidade e número de Reynolds. Dentre esses, apresenta as características da água para a temperatura média de operação de cada sistema piloto.

Tabela 43 – Valores dos parâmetros aplicados.

Parâmetro	Valor	Unidade
Aceleração da gravidade (g)	9,81	m/s ²
Coefficiente de Manning (<i>n</i>) para duto de aço (misturador rápido)	0,011	-
Propriedades da água: T = 20,9 °C – Decantador 1		
Viscosidade cinemática da água (<i>v</i>)	9,902.10 ⁻⁷	m ² /s
Massa específica da água (<i>ρ</i>)	998,08	kg/m ³
Viscosidade dinâmica da água (<i>μ</i>)	0,000979	N.s/m ²
Propriedades da água: T = 24,7 °C – Decantador 2		
Viscosidade cinemática da água (<i>v</i>)	9,066.10 ⁻⁷	m ² /s
Massa específica da água (<i>ρ</i>)	997,13	kg/m ³
Viscosidade dinâmica da água (<i>μ</i>)	0,000891	N.s/m ²

ANEXO A – PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE TRATABILIDADE (JARTEST)

O equipamento Jarrest usado nesta pesquisa (Figura 33) possui os seguintes acessórios e características:

- a) 06 jarros (cubas) em acrílico, com capacidade individual de 2 L;
- b) 06 agitadores com paletas retangulares e sistema de haste livre, que permite isolar um jarro sem parar os demais;
- c) gradientes de velocidade: variável de 10 a 1200 s⁻¹ (10 a 600 rpm);
- d) controle de rotação com tacômetro digital (medidor de rotações por minuto);
- e) sistema de extração de amostras: basculamento simultâneo;
- f) 02 réguas, com 06 cubetas cada, dotadas de basculamento simultâneo para aplicação de até 02 produtos químicos;
- g) 06 cubetas para descarte e 06 cubetas para amostras;
- h) régua para encaixe e movimentação das cubetas de descarte e amostra.

O procedimento do ensaio de tratabilidade, realizado no equipamento descrito, para a determinação dos tempos de detenção, gradientes de velocidade e dosagem de coagulante e alcalinizante, se prosseguiu inicialmente de acordo com os seguintes passos (DI BERNARDO, DI BERNARDO, CENTURIONE FILHO, 2002):

- 1) limpar os jarros e separar as vidrarias necessárias;
- 2) preparar as soluções de coagulante e alcalinizante com concentrações compatíveis com as dosagens a serem aplicadas;
- 3) colocar porções da água bruta em cada um dos seis jarros, enchendo-os de modo a assegurar a homogeneidade da água contida em cada um, até a obtenção 2 litros. A fixação da temperatura é importante, pois ensaios com uma mesma água e temperaturas diferentes podem conduzir a resultados desiguais, uma vez que a temperatura influi significativamente na viscosidade da água e na constante da velocidade de reação das espécies de alumínio ou de ferro utilizadas como coagulante. A temperatura crítica é a temperatura da água no mês mais frio;
- 4) colocar os volumes correspondentes às dosagens dos produtos nos recipientes apropriados do Jarrest;
- 5) colocar os recipientes de descarte e coleta de amostra de água em diferentes etapas do processo nas respectivas posições apropriadas do equipamento;

- 6) ligar o equipamento de agitação e acertar a rotação para 100 rpm;
- 7) adicionar, concomitantemente, o volume correspondente à dosagem preestabelecida de alcalinizante nos jarros;
- 8) após o tempo de contato, acertar a rotação correspondente ao gradiente de velocidade médio de mistura rápida (G_{MR}) desejado (entre 300 e 500 rpm);
- 9) adicionar aos jarros do aparelho, concomitantemente, o volume preestabelecido de coagulante contido nos recipientes de dosagem;
- 10) quando for o caso, aplicar a quantidade prevista de polímero contida nos recipientes apropriados (após a introdução do coagulante);
- 11) transcorrido o tempo de mistura rápida (T_{MR}), reduzir a rotação do equipamento para o valor correspondente ao gradiente de velocidade médio de floculação (G_f) desejado (entre 20 e 60 rpm);
- 12) transcorrido o tempo de floculação (T_f), desligar o sistema de agitação do aparelho;
- 13) coletar as amostras de água decanta para a velocidade de sedimentação desejada. Como o ponto de coleta de amostra está situado a 7 cm de altura em relação ao nível da água, se a velocidade de sedimentação inicial preestabelecida para o ensaio for de 1,5 cm/min, as amostras de água decantada deverão ser coletadas 2 min e 20 s após a parada do agitador. Analogamente, para velocidade de sedimentação de 3,0 cm/min, as amostras devem ser coletadas após 4 min e 40 s depois que o misturador parar. Obs.: antes do início de cada coleta (2s antes), deve ser descartado pequeno volume de água, para que a amostra não sofra interferência da água remanescente na mangueira de coleta;
- 14) ler os parâmetros de controle de qualidade das amostras coletadas.