

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS – MEP

PROJETO, INSTALAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DECANTADOR LAMELAR EM
CONTRACORRENTE PARA CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA
METALÚRGICA

JULIANO SOBRAL

Joinville
2013

JULIANO SOBRAL

PROJETO, INSTALAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DECANTADOR LAMELAR EM
CONTRACORRENTE PARA CLARIFICAÇÃO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA
METALÚRGICA

Dissertação apresentada para
obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Processos
na Universidade da Região de
Joinville - UNIVILLE.

Orientador: Profa. Dra. Sandra
Helena Westrupp Medeiros

Co-orientador: Prof. Dr. Ozair
Souza

Joinville

2013

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

S677p Sobral, Juliano
Projeto, instalação e avaliação de decantador lamelar em contracorrente para clarificação de efluente de indústria metalúrgica / Juliano Sobral ; orientadora Dra Sandra Helena Westrupp Medeiros – Joinville: UNIVILLE, 2013.

114 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)

1. Indústria metalúrgica – Decantador lamelar – Clarificação de efluentes. I. Medeiros, Sandra Helena Westrupp (orient.). II. Título.

CDD 669

Termo de Aprovação

“Projeto, instalação e avaliação de decantador lamelar em contracorrente para clarificação de efluente de indústria metalúrgica”

por

Juliano Sobral

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Profª. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Ozair Souza
Coorientador (UNIVILLE)

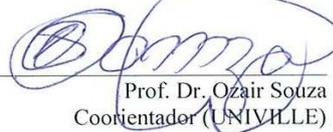


Profª. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

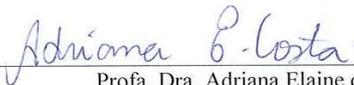
Banca Examinadora:



Profª. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Ozair Souza
Coorientador (UNIVILLE)



Profª. Dra. Adriana Elaine da Costa
(UNISOCIESC)



Profª. Dra. Noeli Sellin
(UNIVILLE)

Joinville, 10 de dezembro de 2013.

LISTA DE SIMBOLOS

- 1 - Fr – fração parcial removida
- A – área superficial útil
- a – largura de seção para o raio hidráulico do duto retangular
- AMD – antigo módulo de decantação
- A_o – área da seção transversal do duto
- b – comprimento de seção para o raio hidráulico do duto retangular
- B – largura da seção transversal do decantador horizontal
- b_{AMD} – largura interna do duto do antigo módulo de decantação
- b_{eAMD} – largura externa do antigo módulo de decantação
- b_{NMD} – largura interna do duto do novo módulo de decantação
- b_{PAMD} – largura de placa do antigo módulo de decantação
- C – fator geométrico em função do tipo de duto
- C_1 – constante de 1º integração
- C_{AMD} – comprimento total do antigo módulo de decantação
- C_D – coeficiente de arraste
- C_{es} – comprimento externo do suporte
- C_{is} – comprimento interno do silo de decantação
- C_M – comprimento total do módulo
- C_o – constante de integração
- C_p – comprimento de placa cimentícia
- d – diâmetro real
- d_{AMD} – diâmetro interno do duto do antigo módulo de decantação
- d_{ic} – distância interna da canaleta
- d_{NMD} – diâmetro interno do duto do novo módulo de decantação
- d_P – afastamento entre placas planas
- d_{VA} – diâmetro da viga de assento
- d_{Xi} – largura de faixa
- d_{xi} – largura média
- $d_{xi}.V_{xi}$ – área de cada faixa
- $d_{xi}.V_{xi}$ – área parcial ocupada

E (%) – eficiência de remoção

E_{AMD} – espessura de placas do antigo módulo de decantação

E_B – espessura de camada de borracha

E_C – espessura de chapa metálica

ECS – ensaio em coluna de sedimentação

E_P – espessura de placa cimentícia

ETE – estação de tratamento de efluentes

f – fator de atrito de Fanning

F_A – força de arraste

F_G – força gravitacional

F_r – fração

F_t – fração total removida

g – aceleração da gravidade

G – gradiente de velocidade

g/h – gramas por hora

g/m^3 – gramas por metro cubico

H – altura da seção transversal do decantador horizontal

h – altura de posicionamento da partícula no decantador do tipo horizontal

h_1 – profundidade 1 de coleta de amostra na coluna de sedimentação

h_2 – profundidade 2 de coleta de amostra na coluna de sedimentação

h_3 – profundidade 3 de coleta de amostra na coluna de sedimentação

H_{AMD} – altura do antigo módulo de decantação

H_{es} – altura externa do suporte

H_{is} – altura de instalação de placas no interior do silo de decantação

h_L – profundidade de coleta de sedimento na coluna de sedimentação

H_P – altura total das placas

H_S – altura interna de instalação do módulo no silo de decantação

Hz – frequência de funcionamento de bomba dosadora

J – perda de carga unitária

l – comprimento real da placa plana

L – comprimento relativo

$L'S$ – comprimento relativo de transição

l_{AMD} – comprimento real da placa do antigo módulo de decantação

L_D – comprimento do decantador do tipo horizontal
 l_{es} – largura externa do suporte
 l_{is} – largura interna do silo de decantação
 l_p – largura de placa cimentícia
 l_{PAMD} – comprimento de duto do antigo módulo de decantação
 l_S – largura interna do silo de decantação
 L_T – comprimento relativo total
 l_U – comprimento útil do duto
 N – número de dutos formados
 NMD – novo módulo de decantação
 N^0_{AMD} – número de dutos do antigo módulo de decantação
 P (%) – Percentagem de remoção de partículas
 Q – vazão operacional de tratamento
 Re – número de Reynolds
 R_H – raio hidráulico
 S – condição crítica de posicionamento da partícula no interior do duto
 S_0 – valor inicial de turbidez
 SD – silo de decantação
 SDL – sistema de decantação lamelar
 $\Sigma dx_i.V_{xi}$ – área total ocupada
 SFR – sistema de filtração rápida
 S_i – valor de turbidez remanescente
 STQ – sistema de tratamento químico
 t_1 – tempo de deslocamento da partícula no L_D do decantador horizontal
 t_2 – tempo de sedimentação na partícula no decantador horizontal
 TAS - taxa de aplicação superficial
 TDH – tempo de detenção hidráulica
 TDH_T – tempo de detenção hidráulica total
 TDH_{AMD} – tempo de detenção hidráulica do antigo módulo de decantação
 TDH_{NMD} – tempo de detenção hidráulica do novo módulo de decantação
 te_1 – tempos de ensaio de 30 minutos
 te_2 – tempos de ensaio de 40 minutos
 te_3 – tempos de ensaio de 50 minutos

TQ Floc Mec – tanque de floculação mecânica

TQ MR – tanque de mistura rápida

u – velocidade de escoamento do fluido

ν – viscosidade cinemática do fluido

V_{CS} – velocidade crítica de sedimentação

V_C – velocidade crítica de sedimentação no decantador ideal

V_o – velocidade longitudinal

$V_{o\text{máx}}$ – velocidade longitudinal máxima

V_p – velocidade da partícula

V_{px} – velocidade da partícula no eixo X

V_{py} – velocidade da partícula no eixo y

V_S – velocidade de sedimentação

V_{VP} – volume da partícula

V_{xi} – velocidade média de sedimentação

x – coordenada de eixo horizontal

y – coordenada de eixo vertical

α – largura da placa plana paralela

ρ – densidade do fluido

ρ_P – densidade da partícula

τ – tensão de cisalhamento hidrodinâmico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coeficiente de arraste (C_D) para tipos de partículas em função do número de Reynolds (Re).	23
Figura 2 – Trajetória da partícula na sedimentação discreta	26
Figura 3 – Trajetória de uma partícula discreta entrando na zona sedimentação em uma altura no tanque abaixo do nível de líquido	28
Figura 4 – Esquema de um decantador com laje intermediária, instalada a uma altura h a partir do nível de líquido localizado no ponto A	29
Figura 5 – Sistemas de decantação lamelar	30
Figura 6 – Sistema de coordenada para o movimento da partícula P	32
Figura 7 – Sistema de decantação em alta taxa utilizando sedimentador do tipo duto circular	35
Figura 8 – Representação esquemática do perfil de velocidades no interior de um duto	38
Figura 9 – Fluxograma das atividades desenvolvidas e dos cálculos realizados para projeto e instalação do módulo de decantação lamelar	42
Figura 10 – Fluxograma das atividades desenvolvidas e dos cálculos realizados para projeto e instalação do módulo de decantação lamelar (continuação)	44
Figura 11 – Fluxo do processo da ETE	51
Figura 12 – Arraste de flocos no vertedor (vista superior interna (a) e vista superior externa (b)) de saída de efluente do silo de decantação (SD)	54
Figura 13 – Fixação da viga de assento para o novo módulo de decantação (NMD) no interior do silo de decantação (SD)	66
Figura 14 – Dimensões geométricas (mm) do novo módulo de decantação (NMD) do tipo placa plana paralela, determinadas em função do valor de ângulo de inclinação (Θ) de 60°	72
Figura 15 – Dimensões geométricas (mm) do suporte de fixação para o novo módulo de decantação (NMD) do tipo placa plana paralela	73
Figura 16 – Placa cimentícia fornecida comercialmente com as dimensões geométricas de 10 mm (E_p) x 2000 mm (C_p) x 1200 mm (I_p)	74

Figura 17 – Instalação de chapa em área com ausência de placas no interior do novo módulo de decantação (NMD)	75
Figura 18 – Aplicação de revestimento de fibra no suporte de fixação	76
Figura 19 – Aplicação de borracha de vedação na viga de assento	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU	56
Tabela 2 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU	57
Tabela 3 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU	57
Tabela 4 – Taxa de aplicação superficial (TAS) avaliadas no ensaio em coluna de sedimentação (ECS)	59
Tabela 5 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU	60
Tabela 6 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU	61
Tabela 7 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU	62
Tabela 8 – Resultado de velocidade máxima de escoamento longitudinal ($V_{o\ máx}$) para a velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) de 1,4 m/h em função do número de Reynolds (Re) de 244,20 e velocidade longitudinal de escoamento ($V_{o\ máx}$) de 9,23 m/h.....	64
Tabela 9 – Resultados de comprimento relativo (L), comprimento relativo total (L_t) e comprimento útil (l_U) em função do valor de ângulo de inclinação (Θ) ...	68

Tabela 10 – Resultados de afastamento entre placas (d_P), comprimento total (l) de duto em função do valor de comprimento útil (l_U) de duto e ângulo de inclinação (Θ)	69
Tabela 11 – Resultados de altura de placa (H_P), determinados em função do valor de comprimento total (l) de duto e ângulo de inclinação (Θ)	70
Tabela 12 – Resultados de área superficial útil (A) e número de canais (N) em função do valor de comprimento relativo (L) de duto e ângulo de inclinação (Θ)	71
Tabela 13 – Resultados de comprimento de módulo (C_m) em função do valor de comprimento total (l) de duto e ângulo de inclinação (Θ)	71
Tabela 14 – Resultados de turbidez remanescente (S_i) obtidos em cada ensaio com o novo módulo de decantação (NMD)	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tempo de detenção hidráulico (TDH) e gradientes de velocidade (G) nos tanques de mistura rápida (TQ MR) e floculação mecânica (TQ Floc Mec) da ETE	52
Quadro 2 – Frequência de funcionamento (Hz) das bombas dosadoras de Tanfloc e Nalcolyte 4684 e suas respectivas concentrações (g/m ³) de dosagem sob a vazão operacional (Q) de 20 m ³ /h	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores médios de turbidez (S_0), presentes na composição do efluente bruto	50
Gráfico 2 – Valores limites de turbidez remanescente (S_i) obtidos durante a operação do antigo módulo de decantação (AMD)	54
Gráfico 36 – Comparativo de percentagem (P(%)) de remoção de partículas em função da taxa de aplicação superficial (TAS) para cada ensaio em coluna de sedimentação (ECS)	63
Gráfico 37 – Valores médios de turbidez remanescente (S_i) obtidos em cada ensaio com o novo módulo de decantação (NMD)	79
Gráfico 38 – Valores de eficiência de remoção (E (%)) obtidos em cada ensaio com o novo módulo de decantação (NMD)	80
Gráfico 39 – Comparativo dos valores limites de turbidez remanescente (S_i) entre o antigo módulo de decantação (AMD) e o novo módulo de decantação (NMD)	82

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Detalhes e dimensões (mm) de projeto da coluna de sedimentação	93
APÊNDICE B – Detalhes e dimensões (mm) de projeto do silo de decantação (SD)	94
APÊNDICE C – Gráficos com as curvas obtidas nos ensaio em coluna de sedimentação (ECS)	97
APÊNDICE D – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU.....	99
APÊNDICE E – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU.....	104
APÊNDICE F – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU	109
APÊNDICE G – Informações do teste de normalidade para os valores de turbidez remanescente (S_i) obtidos durante a operação do novo módulo de decantação (NMD)	114
APÊNDICE H – Informações do teste de hipóteses ANOVA para os valores de turbidez remanescente (S_i) obtidos durante a operação do novo módulo de decantação (NMD)	115

SUMÁRIO

RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
INTRODUÇÃO.....	19
1. OBJETIVOS	21
1.1 Objetivo principal	21
1.2 Objetivos específicos.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Teoria da sedimentação	22
2.2 Tipos de sedimentação	25
2.3 Teoria do decantador ideal.....	26
2.4 Decantadores tubulares ou lamelares.....	29
2.5 Modelagem matemática para sedimentação em dutos	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 Metodologia para dimensionamento do módulo de decantação do tipo placa plana paralela	41
3.2 Ensaio em coluna de sedimentação (ECS): Determinação da taxa de aplicação superficial (TAS) a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD)	47
3.3 Determinação da eficiência (E (%)) de remoção de turbidez do novo módulo de decantação (NMD).....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Etapa 1 - Identificação dos parâmetros de controle do sistema de tratamento químico (STQ) e diagnóstico das condições geométricas de projeto e de operação do antigo módulo de decantação (AMD)	50
4.2 Etapa 2 - Diagnóstico das condições de escoamento no interior dos dutos do antigo módulo de decantação (AMD)	55
4.3 Etapa 3 - Ensaio em coluna de sedimentação (ECS): Determinação da taxa de aplicação superficial (TAS) a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD)	56

4.4 Etapa 4 - Determinação da velocidade de escoamento longitudinal máxima ($V_{O \text{ máx}}$) no interior do antigo módulo de decantação (AMD), necessária para evitar o arraste de flocos na condição mínima de dosagem de reagentes químicos.....	64
4.5 Etapa 5 - Determinação da condição geométrica no interior de cada duto, a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD) para evitar o arraste de flocos na condição mínima de dosagem de reagentes químicos ...	65
4.6 Etapa 6 - Determinação das medidas necessárias para dimensionamento do novo módulo de decantação (NMD)	66
4.7 Etapa 7 - Construção e instalação do novo módulo de decantação (NMD)	72
4.8 Etapa 8 - Avaliação da eficiência (E (%)) de remoção de turbidez do novo módulo de decantação (NMD)	77
5 CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICES.....	92

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o projeto, instalação e avaliação de um módulo de decantação lamelar, utilizado para clarificação de efluente bruto sob uma vazão operacional de 20 m³/h na condição mínima de dosagem de reagentes químicos. Inicialmente, foi verificado que as dimensões de projeto do antigo módulo de decantação não proporcionavam as condições hidráulicas de escoamento necessárias para remover sob uma vazão operacional de tratamento de 20 m³/h, as partículas originadas na condição mínima de dosagem de coagulante e floculante, ocasionando assim, elevado arraste de flocos e baixa eficiência na clarificação do efluente bruto gerado no processo de lavagem de gases industriais. Um roteiro de cálculo elaborado com base em normas técnicas e bibliografias específicas, foi empregado para determinar as dimensões geométricas a serem consideradas no projeto do novo módulo de decantação, o qual foi dimensionado respeitando as medidas internas do silo existente no sistema de decantação lamelar. Após a instalação do novo módulo de decantação, foi verificado que durante o processo de tratamento, realizado sob uma vazão operacional de 20 m³/h e praticando a condição de dosagem mínima de reagentes químicos, o novo dispositivo apresentou valores de eficiência superiores a 89 % quanto à clarificação do efluente bruto, validando o emprego desse novo módulo de decantação, visto que o antigo dispositivo obteve eficiência máxima de remoção de 85 %.

Palavras-Chave: *decantador lamelar, clarificador lamelar, módulo de decantação lamelar*

ABSTRACT

This work has as objective to present the design, installation and evaluation of a lamellar settling module used for clarification of raw wastewater at an operational flow rate of 20 m³/h under minimum condition dosing of chemical reagents. Initially, it was found that the size of the old module design did not provide the hydraulic flow conditions required to remove particles originating in the condition of minimum dosing of coagulant and flocculant at an operational processing flow of 20 m³/h, causing therefore high drag flakes and low efficiency in the clarification of raw wastewater generated by a scrubber. A script calculation made based on technical standards and specific bibliographies, was employed to determine the geometric dimensions to be considered in the new module settling, which has been designed respecting the internal measures of the existing lamellar settling tank. After the installation of the new module settling, was verified that during the treatment process, carried from an operational flow of 20 m³/h practicing the condition of minimum dosage of chemical reagents, the new device showed efficiency values higher than 89% on the clarification of wastewater, validating the use of this new module settling, since the old device obtained maximum removal efficiency of 85%.

Keywords: *lamellar settler, lamellar clarifier, lamellar settling module*

INTRODUÇÃO

Algumas unidades de decantação são projetadas, utilizando como base de cálculo, valores sugeridos em normas específicas ou valores experimentais obtidos em outros projetos que apresentam alguma semelhança nas vazões e características do efluente. Este procedimento pode resultar em baixa eficiência do decantador na remoção de turbidez do efluente bruto, exigindo na maioria das vezes, readequações na operação da unidade ou alterações físicas no tanque, refletindo assim, em custos desnecessários. Sendo assim, os critérios utilizados para dimensionamento de decantadores merecem total atenção por parte dos profissionais envolvidos no projeto.

Dentre os vários modelos de decantadores conhecidos para uso em Estações de Tratamento de Efluentes, os decantadores lamelares tem tido destacada atenção por apresentarem alta taxa de escoamento e por possibilitarem, na maioria das vezes, menor custo de construção em comparação aos decantadores convencionais.

O conceito de projeto dos decantadores lamelares está baseado diretamente na taxa de aplicação superficial ($m^3/m^2.dia$), desta maneira, a eficiência na remoção de partículas sólidas está relacionada diretamente com a área disponível para sedimentação e não com a profundidade do tanque como na sedimentação discreta em decantador de escoamento horizontal (Robescu et al., 2010). Portanto, para tratar a quantidade de efluentes industriais gerados e atingir a redução desejada na sua turbidez, atenção especial deve ser dada ao dimensionamento e instalação do módulo de decantação no interior dos decantadores lamelares.

No presente trabalho, visando aumentar a eficiência de remoção de turbidez do efluente bruto gerado em um sistema de lavagem de gases industriais do processo de fusão de uma indústria metalúrgica, a qual não vinha sendo atingida pelo sistema de decantação lamelar em operação da ETE, foi realizado o projeto, a instalação e a aplicação de um novo módulo de decantação lamelar frente a condição mínima de dosagem de reagentes químicos estabelecidos para coagulação e floculação no sistema de tratamento químico. Foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica sobre o assunto e metodologia de cálculo, das quais foram obtidas informações necessárias para determinação das medidas de diâmetro interno de duto, comprimento de placas, número de canais, altura de placas e comprimento de módulo. Após construção e instalação desse dispositivo no silo de decantação já existente na ETE, foi obtida eficiência superior a 89 % na remoção da turbidez presente na composição do efluente bruto.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo principal

Projetar, instalar e avaliar um módulo de decantação lamelar de placas planas, visando tratar 20 m³/h de efluente bruto gerado em um sistema de lavagem de gases provenientes do processo industrial de fusão de uma indústria metalúrgica.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as condições operacionais que vinham sendo praticadas na ETE para a clarificação da corrente de efluente bruto gerado no sistema de lavagem de gases.
- Dimensionar o módulo de decantação lamelar de maneira a atender a vazão operacional de tratamento da ETE, sob uma quantidade mínima de reagentes químicos necessários para a coagulação e floculação das partículas em suspensão no efluente bruto.
- Construir e instalar o novo módulo de decantação no silo de decantação já existente na ETE.
- Determinar a eficiência do novo módulo de decantação na remoção de turbidez e comparar com aquela que vinha sendo praticada no sistema em operação na ETE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Teoria da sedimentação

De acordo com Lira (2010), a sedimentação é um processo de separação sólido-fluido, baseado na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão, onde a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional. Esta operação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento.

Conforme Filho e Branco (1964), qualquer partícula de densidade maior do que 1,0, sob a influência da gravidade decantará na água numa velocidade acelerada até que a resistência do líquido se iguale ao peso efetivo da partícula. A partir deste momento, a velocidade de sedimentação será essencialmente constante e dependerá do tamanho, forma e densidade da partícula, assim como da densidade e viscosidade da água. Para a maioria das computações teóricas e práticas das velocidades de decantação, a forma das partículas é considerada esférica.

Uma partícula discreta com densidade ρ_P em processo de sedimentação em um fluido de densidade ρ , está sujeita à força gravitacional (F_G) dada pela Equação 1 e à Força de Arraste (F_A) dada pela Equação 2:

$$F_G = g \cdot V_P \cdot (\rho_P - \rho) \quad (1)$$

$$F_A = \left(\frac{V_S^2}{2} \right) \cdot C_D \cdot \rho \cdot A_p \quad (2)$$

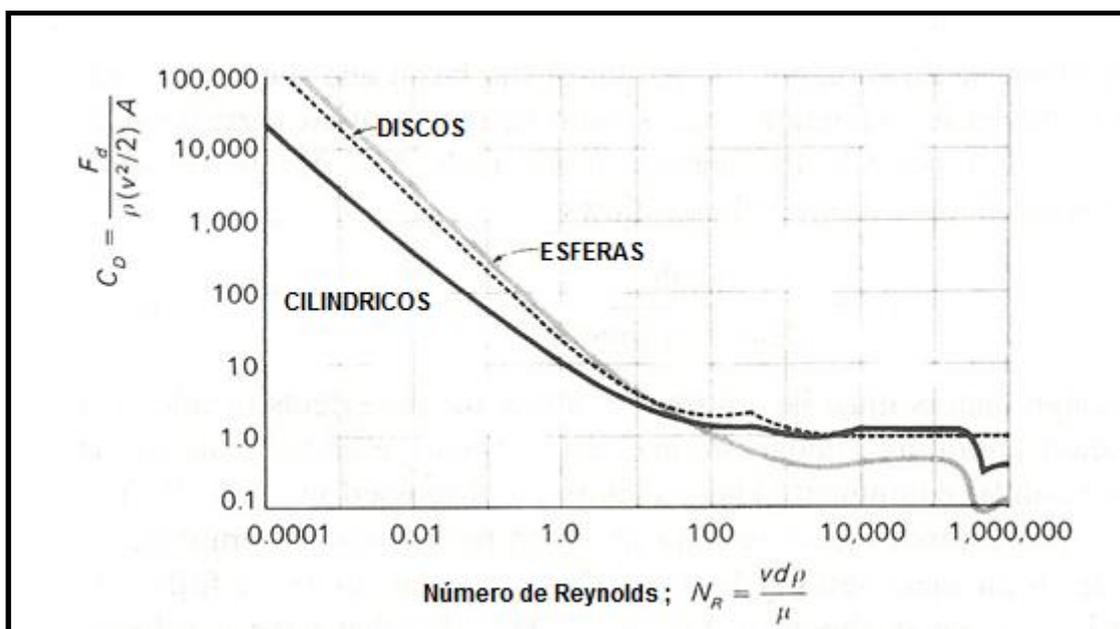
Igualando as Equações 1 e 2 e rearranjando os seus termos, obtém-se a velocidade de sedimentação (V_s) para uma partícula esférica, apresentada por Tchobanoglous e Burton (1991) na forma da Equação 3:

$$V_s = \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho) \cdot d_p \cdot g}{\rho \cdot C_D} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Pereira (2010) define que o coeficiente de arraste (C_D) apresentado por Tchobanoglous e Burton (1991) na Equação 3, é um coeficiente de força adimensional usado para quantificar a resistência de um objeto à passagem de um fluido. O C_D está relacionado com a força de arraste, que por definição, é o componente da força paralela à direção do escoamento, não sendo assim, um valor constante, pois depende então do número de Reynolds (Re) e de outras grandezas adimensionais geométricas.

Conforme apresentado na Figura 1, o C_D assume diferentes valores em função do regime de fluxo em torno das partículas.

Figura 1 – Coeficiente de arraste (C_D) para tipos de partículas em função do número de Reynolds (Re).



Fonte: Tchobanoglous e Burton, 1991

Uma partícula caindo no vácuo, sob um campo uniforme de forças, geralmente gravitacional, não sofre resistência à sua queda. Logo, a velocidade de queda da mesma cresce indefinidamente, independente do seu tamanho e densidade. O movimento dessa mesma partícula, se imersa em um meio fluido qualquer, fica sujeito a uma força resistiva, cuja magnitude depende do regime fluidodinâmico vigente, além dos aspectos morfológicos dessa partícula. Quando o equilíbrio é alcançado entre a força gravitacional e a força de resistência do fluido, a partícula alcança sua velocidade terminal de sedimentação e assim, cai a uma taxa constante. É praxe descrever o regime fluidodinâmico através do valor de Re , que é o parâmetro adimensional que expressa a razão entre as forças inerciais e viscosas (LIMA e LUZ, 2001).

Para determinar os valores de C_D de acordo com o valor de Re , Vlasbom e Miedema (1995) propõem as seguintes Equações:

$$\text{Para } Re < 1; \quad C_D = \frac{24}{Re} \quad (4)$$

$$\text{Para } 1 < Re < 2000 ; \quad C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad (5)$$

$$\text{Para } Re > 2000 ; \quad C_D = 0,4 \quad (6)$$

Para Tchoubanogous e Burton (1991), considerando um valor de Re inferior a 0,3, que fica definido como um valor característico para uma partícula em processo de sedimentação, a Equação 3 pode ser reescrita na forma da Equação 7:

$$V_s = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot d^2}{18 \cdot \mu} \quad (7)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica da água. Assim, tem-se a lei de Stokes para a velocidade de sedimentação da partícula.

2.2 Tipos de sedimentação

Devido à concentração, forma e natureza das partículas presentes em uma determinada suspensão, o processo de sedimentação é classificado em:

- a) Sedimentação Tipo 1 ou Discreta – as leis definidas para a velocidade de sedimentação através das equações de Newton e Stokes se aplicam apenas para este tipo de sedimentação, pois as partículas características deste tipo de sedimentação, não alteram sua forma, tamanho e densidade, quando presentes em soluções diluídas (TCHOBANOGLIOUS e BURTON, 1991).
- b) Sedimentação Tipo 2 ou Floculenta – neste tipo de sedimentação, as partículas se aglomeram formando flocos, que tendem a crescer de tamanho à medida que sedimentam. Com o aumento do tamanho das partículas, aumenta a velocidade de sedimentação. Assim, na sedimentação floculenta, a velocidade de sedimentação não é constante, como na sedimentação discreta (VON SPERLING, 1996). De acordo com Richter (2009), este tipo de sedimentação ocorre quando na clarificação de águas e no tratamento de esgoto, devido a própria natureza das partículas, ou em função da aplicação de coagulantes.
- c) Sedimentação Tipo 3 ou por Zona - Este tipo de sedimentação ocorre geralmente em decantadores secundários durante a sedimentação de lodos biológicos. Há uma interação das partículas circunvizinhas em suspensões razoavelmente concentradas e a massa das partículas sedimenta como um todo com uma interface sólido-líquido bem definida (CAVALCANTI, 2009).
- d) Sedimentação Tipo 4 ou Compressiva - este tipo de sedimentação ocorre quando, devido ao peso, as partículas presentes na fase líquida são depositadas onde já existem outras partículas já sedimentadas, com isto, são pressionadas umas sobre as outras. Devido a esta compressão, parte da água presente na estrutura do floco formado é removida, reduzindo assim, o volume do mesmo. Geralmente, este tipo de sedimentação ocorre no fundo de decantadores secundários e em adensadores por gravidade (VON SPERLING, 1997).

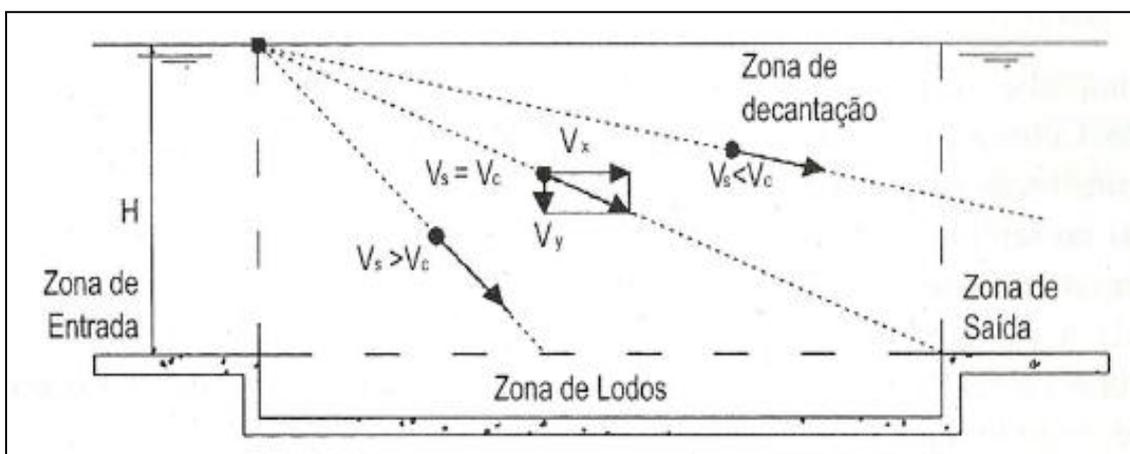
2.3 Teoria do Decantador Ideal

Devido às diferenças de tamanho e forma das partículas, a decantação apresenta grande dificuldade de ser descrita. Com isso, se utiliza o modelo do decantador ideal de escoamento horizontal para prever o comportamento das partículas. Algumas suposições simplificadas caracterizam este modelo (LOPES, 2005):

- Dentro da zona de sedimentação, as partículas sedimentam de forma análoga a em um recipiente em repouso de mesma profundidade;
- O escoamento e a concentração das partículas em suspensão são uniformes em toda seção transversal;
- Uma vez que os flocos atingem a Zona de Lodo, não há ressuspensão dos mesmos.

Na Figura 2, é apresentado um modelo de sedimentação discreta, considerando a situação mais desfavorável, na qual a partícula adentra a unidade de decantação na superfície da lâmina da água, sendo que, para esta análise, serão consideradas duas velocidades: velocidade média longitudinal de escoamento (V_0) e velocidade de sedimentação da partícula (V_s) (LIBÂNIO, 2008).

Figura 2 - Trajetória de uma partícula na sedimentação discreta



Fonte: Libânio, 2008

Para uma dada vazão (Q) de afluente a um decantador de seção transversal de largura (B) e profundidade (H), tem-se a Equação 8:

$$V_o = \frac{Q}{B \cdot H} \quad (8)$$

Considerando que a partícula percorrerá todo o comprimento (L_D) do decantador durante um tempo (t_1) (Equação 9) e que, em função da V_s , a partícula atingirá o fundo do decantador em um tempo (t_2) (Equação 10).

$$t_1 = \frac{L_D}{V_o} \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{H}{V_s} \quad (10)$$

Para a partícula atingir simultaneamente o fundo do decantador no final de L_D , t_1 deverá ser igual a t_2 . Assim,

$$\frac{L_D}{V_o} = \frac{H}{V_s} \quad (11)$$

Combinando as Equações 8 e 11 tem-se que:

$$\frac{B \cdot H \cdot L_D}{Q} = \frac{H}{V_s} \quad (12)$$

Isolando V_s da partícula, a Equação 12 pode ser reescrita como:

$$V_s = \frac{Q}{B \cdot L_D} = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

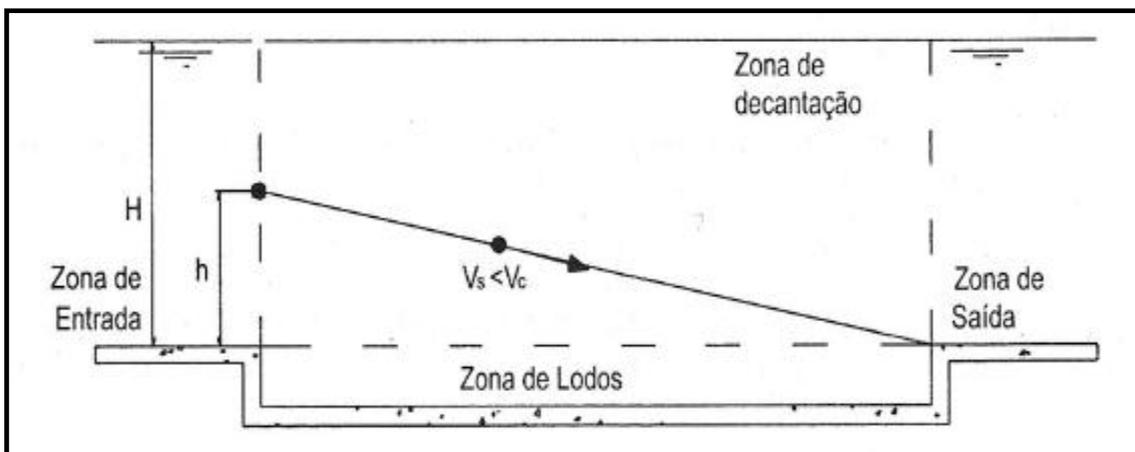
Desta forma, a V_S é denominada de Taxa de Aplicação Superficial (TAS). A V_S que acarretará a remoção da partícula na condição mais desfavorável no modelo proposto, será denominada de Velocidade Crítica de Sedimentação (V_C). Então, analisando a Figura 2, somente as partículas com V_S maior ou igual a V_C , serão removidas no decantador em questão.

Conforme apresentado por Libânio (2008) na Figura 3, as partículas com V_S menor que a V_C , serão removidas proporcionalmente à razão entre H e h .

Assumindo que estas partículas se encontrem igualmente distribuídas ao longo da profundidade do decantador, tem-se por semelhança de triângulos, que H corresponderá a V_C e h corresponderá a V_S . Desta maneira, será dada a Equação 14:

$$\frac{h}{H} = \frac{V_S}{V_C} \quad (14)$$

Figura 3 – Trajetória de uma partícula discreta entrando na zona de sedimentação em uma altura no tanque abaixo do nível de líquido



Fonte: Libânio, 2008

Conforme verificado com a Equação 14, as partículas V_S inferior a V_C , serão removidas proporcionalmente a posição vertical que ocuparem na entrada da unidade de decantação.

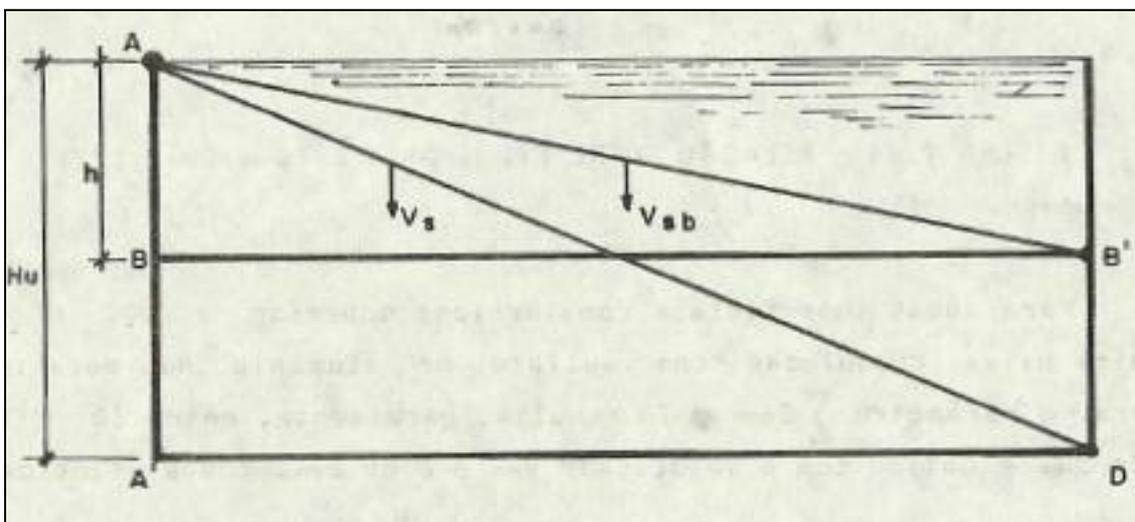
2.4 Decantadores Tubulares ou Lamelares

Os decantadores tubulares ou de alta taxa, também são denominados tecnicamente e comercialmente como decantadores lamelares ou laminares.

Segundo Carissimi (2007), esses decantadores são um aperfeiçoamento dos sedimentadores com fundos múltiplos, desenvolvidos a partir de 1915 com base nas experiências desenvolvidas por Hazen em 1904, onde foi evidenciado que a eficiência do tanque de sedimentação depende de sua área e não de sua profundidade.

De acordo com Di Bernardo (1993) e conforme apresentado na Figura 4, se uma laje intermediária for introduzida em um profundidade h a partir do nível da água, as partículas com velocidade de sedimentação (V_{sb}) menor ou igual a uma determinada V_s , seriam removidas, o que antes não ocorreria com um fundo único. Da mesma forma, teoricamente poderia ser admitido que a capacidade de um decantador, como o apresentado na Figura 4, corresponderia ao dobro com a duplicação da área. Porém, o sucesso deste tipo de aplicação foi limitado, pois a altura entre as lajes deveria ser tal que permitisse a limpeza e também, porque o escoamento poderia resultar instável.

Figura 4 – Esquema de um decantador com laje intermediária, instalada a uma altura h a partir do nível de líquido localizado no ponto A



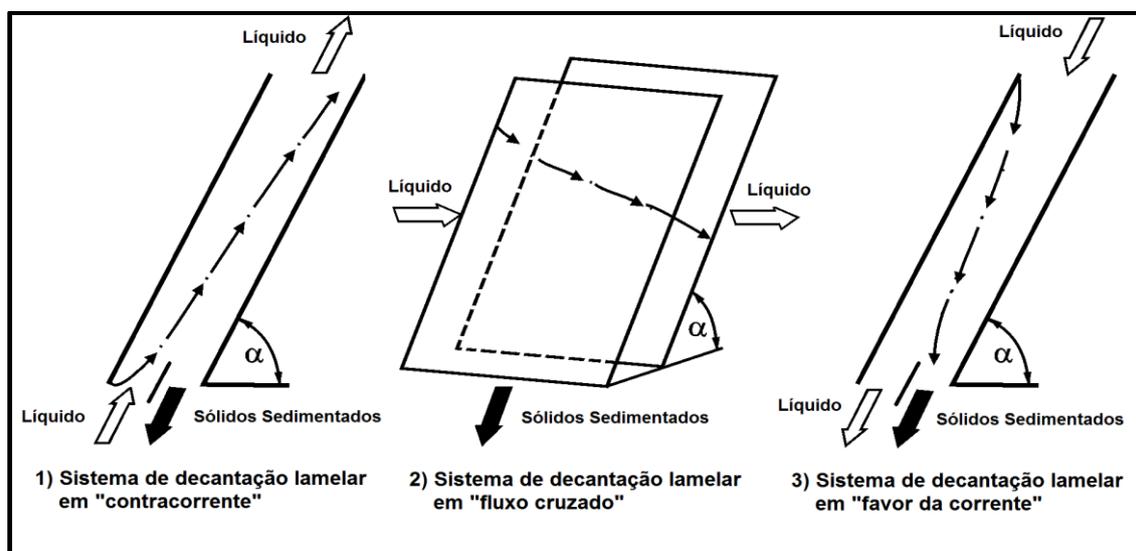
Fonte: Di Bernardo, 1993

Conforme Cunha (2004), os decantadores lamelares podem ser de fluxo horizontal ou vertical, sendo o que os difere dos decantadores convencionais, é o emprego de placas ou módulos no interior dos mesmos, os quais diminuem a turbulência e reduzem o valor de Re . Estes módulos, conforme informado por Di Bernardo (1993), podem ser na forma de dutos de seção circular, quadrada, retangular ou hexagonal. Além disso, esses decantadores apresentam resultados de eficiência de remoção de turbidez superiores aos decantadores convencionais, quando comparados sob a mesma condição operacional. Este fato foi evidenciado por Saady (2012), quando comparou experimentalmente um decantador convencional com um decantador de placa plana paralela, sob a mesma condição de dosagem de coagulante e floculante.

De acordo com Kowalski (2004), os custos envolvidos na construção de unidade de decantação, podem ser muitas vezes reduzidos com a instalação destes tipos de dispositivos, sendo esta, uma grande vantagem no projeto, pois conforme Asgharzadeh (2011), os investimentos e custos com os tanques de sedimentação são cerca de 30 % do custo total com a planta de tratamento.

Conforme Kowalski e Mieso (2004), os decantadores lamelares são classificados em função do sentido de fluxo da suspensão no interior dos dutos, assim, conforme apresentado por Kowalski (2004) na Figura 5, a configuração do sistema de decantação lamelar pode ser do tipo em contracorrente, fluxo cruzado ou corrente paralela.

Figura 5 – Sistemas de decantação lamelar



De acordo com que foi verificado com Gomes (2010), a decantação em contracorrente, em fluxo cruzado e em corrente paralela, ocorrem da seguinte maneira:

- a) Decantação em contracorrente - a alimentação é realizada por baixo dos módulos de sedimentação e o fluxo de líquido ascende pelos canais formados pelas superfícies inclinadas, ao mesmo tempo, os sólidos sedimentam e descem sobre as superfícies inclinadas de cada canal.
- b) Decantação em fluxo cruzado - o fluxo de líquido flui horizontalmente entre as placas, e os sólidos sedimentados se movem para baixo. Neste caso, a ressuspensão de sólidos sedimentados é menor que nos decantadores de contracorrente e nos decantadores com fluxo de corrente paralela;
- c) Decantação em corrente paralela - a sedimentação dos sólidos ocorre no mesmo sentido do fluxo do líquido. Neste tipo de sistema, a alimentação é realizada por cima das superfícies inclinadas, sendo que o fluxo desce pelos canais e os sólidos sedimentados na superfície das placas se movem na mesma direção do fluxo de líquido.

2.5 Modelagem matemática para sedimentação em dutos

Yao (1970) desenvolveu um estudo teórico sobre a sedimentação em dutos, apresentando a possibilidade de determinar o comprimento de duto necessário para a sedimentação de partículas sob uma determinada característica de escoamento. Desta maneira, a modelagem matemática, foi desenvolvida levando em consideração a geometria de diferentes tipos de dutos e o regime de escoamento presente no interior do mesmo ser de característica laminar. Para este estudo, foi considerado ainda, uma partícula do tipo discreta realizando a sua sedimentação em uma seção de duto onde a velocidade de escoamento está inteiramente desenvolvida, com a sua equação de movimento em regime laminar definida por:

$$m \frac{dV_p}{dt} = [(\rho_p - \rho) \cdot V_{VP} \cdot g] - F_A \quad (15)$$

Escrevendo F_A em função das grandezas μ , d_P , V_{VP} e da velocidade de escoamento do fluido (u) (Equação 16) e substituindo essa expressão na Equação 15, ignorando o efeito de inércia, tem-se que:

$$F_A = [(3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_P) \cdot (V_P - u)] \quad (16)$$

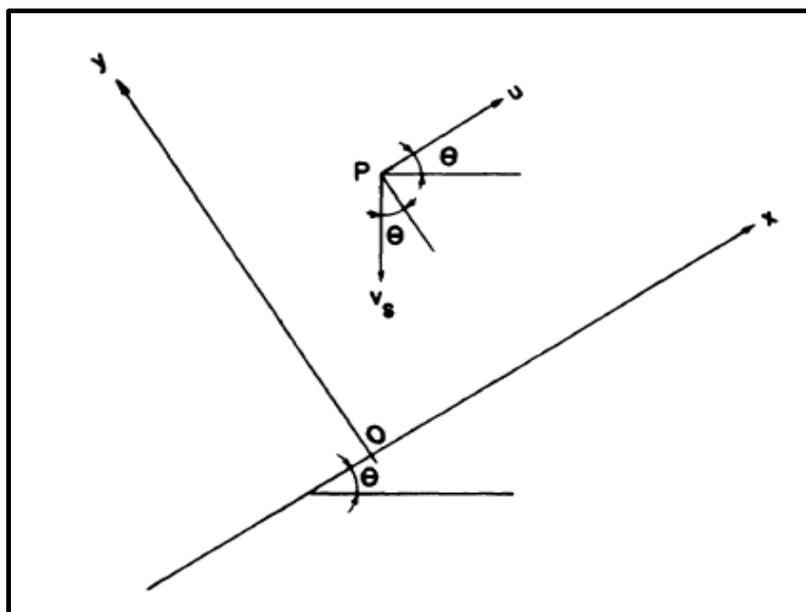
$$V_P - u = \frac{(\rho_P - \rho) \cdot V_{VP} \cdot g}{(3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_P)} \quad (17)$$

Então, a V_S para uma partícula em processo de sedimentação e em direção vertical no interior de um duto pode ser expressa como:

$$V_P - u = V_S \quad (18)$$

Assim, é apresentado na Figura 6, o sistema de coordenadas definido por Yao (1970), para uma partícula P em processo de sedimentação em um duto teórico com um determinado ângulo de inclinação (Θ), desenvolvendo uma V_S e tendo o seu movimento influenciado pela velocidade de escoamento do fluido (u) na direção paralela ao eixo de coordenada x e perpendicular ao eixo de coordenada y .

Figura 6 – Sistema de coordenada para o movimento da partícula P



Fonte: Yao (1970)

De acordo com a Figura 6, a Equação 18 pode ser reescrita na forma de duas equações vetoriais, assim:

$$V_{Px} = u - V_S \cdot \text{sen}\Theta \quad (19)$$

$$V_{Py} = -V_S \cdot \text{cos}\Theta \quad (20)$$

Em função da V_S , a posição desta partícula na coordenada x e y varia em função do tempo. Consequentemente:

$$V_{Px} = \frac{dx}{dt} \quad (21)$$

$$V_{Py} = \frac{dy}{dt} \quad (22)$$

Substituindo as expressões de V_P nas respectivas Equações 19 e 20 e igualando as mesmas em função de dt, temos:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-V_S \cdot \text{cos}\Theta}{u - V_S \cdot \text{sen}\Theta} \quad (23)$$

Rearranjando essa Equação e dividindo os termos de u e V_S por V_0 e os termos dx e dy pelo diâmetro d do duto avaliado, a Equação 23 fica:

$$\left(\int \frac{u}{V_0} \cdot \frac{dy}{d} \right) - \left(\frac{V_S \cdot \text{sen}\Theta}{V_0} \cdot \int \frac{dy}{d} \right) + \left(\frac{V_S \cdot \text{cos}\Theta}{V_0} \cdot \int \frac{dx}{d} \right) = C_0 \quad (24)$$

Substituindo respectivamente y/d e x/d por Y e X e fazendo o ajuste da constante de integração C_0 para C_1 , a Equação 24 pode ser reescrita na forma de:

$$\left(\int \frac{u}{V_0} \cdot dY \right) - \left(\frac{V_S \cdot \text{sen}\Theta}{V_0} \cdot \int dY \right) + \left(\frac{V_S \cdot \text{cos}\Theta}{V_0} \cdot \int dX \right) = C_1 \quad (25)$$

O 1º termo da Equação 25 é referente à trajetória da partícula quando a mesma está em movimento no interior do duto e que de acordo com Yao (1970) é influenciado diretamente pelas condições geométricas do duto utilizado para remoção das partículas em processo de sedimentação.

Yao (1970), ao analisar o movimento de uma partícula sólida em dutos do tipo circular, canal raso e placa plana paralela, considerando ainda, os mesmos perfis de entrada e saída, verificou que o 2º termo e o 3º termo da Equação 25 permanecem os mesmos, independente da configuração do duto. Empregando o escoamento em regime laminar no interior desses dutos, o autor definiu o termo u/V_0 do 1º termo da Equação 25 como sendo $8.[Y - Y^2]$ para duto circular, $3/2.[2Y - Y^2]$ para o duto canal raso e $6.[Y - Y^2]$ para o duto placa plana paralela; e aplicou-os na Equação 25. Assim, ao integrar as respectivas equações resultantes obteve as seguintes expressões para cada um dos dutos, analisados:

Duto do tipo circular;

$$\left(8 \cdot \left[\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_0} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_0} \cdot X\right) = C_1 \quad (26)$$

Duto do tipo raso;

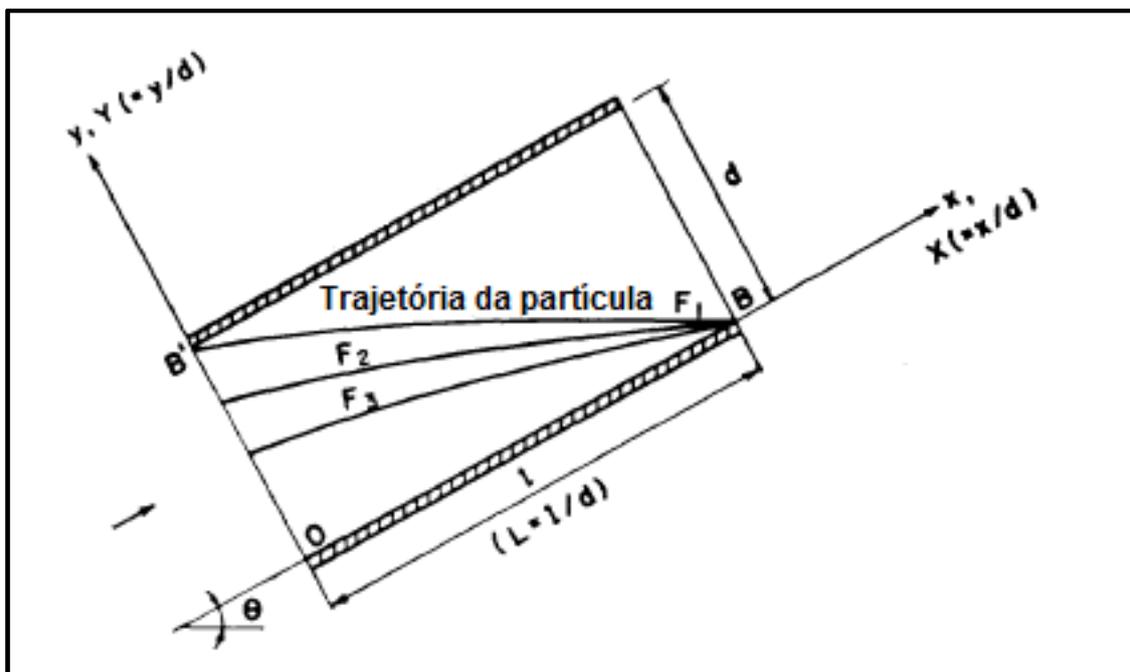
$$\left(6 \cdot \left[\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_0} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_0} \cdot X\right) = C_1 \quad (27)$$

Duto do tipo placa plana paralela;

$$\left(\frac{3}{2} \cdot \left[\frac{2Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_0} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_0} \cdot X\right) = C_1 \quad (28)$$

Com base na Figura 7, é demonstrado a trajetória F_1 , F_2 e F_3 , para uma partícula em movimento no interior de um duto circular. Neste duto, foram definidos as coordenadas X e Y na entrada e saída do sistema.

Figura 7 – Sistema de decantação em alta taxa utilizando sedimentador do tipo duto circular



Fonte: Yao (1970)

Na Figura 7, no ponto B' definido como a saída do duto, são consideradas as coordenadas Y ($y/d = 0$) e X ($l/d = L$). Aplicando estes valores representativos para as coordenadas Y e X nas Equações 26 a 28, é possível definir a constante de integração C_1 na forma da Equação 29, válida para os três dutos considerados:

$$\left(\frac{V_s \cdot \cos\theta}{V_o} \cdot L \right) = C_1 \quad (29)$$

Substituindo a expressão de C_1 nas Equações 26 a 28 e reorganizando-as tem-se:

Duto do tipo circular;

$$\left(8 \cdot \left[\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_o} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_o} \cdot (X - L)\right) = 0 \quad (30)$$

Duto do tipo canal raso;

$$\left(6 \cdot \left[\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_o} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_o} \cdot (X - L)\right) = 0 \quad (31)$$

Duto do tipo placa plana paralela;

$$\left(\frac{3}{2} \cdot \left[\frac{2Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3}\right]\right) - \left(\frac{V_s \cdot \text{sen}\Theta}{V_o} \cdot Y\right) + \left(\frac{V_s \cdot \text{cos}\Theta}{V_o} \cdot (X - L)\right) = 0 \quad (32)$$

Ainda na Figura 7, no ponto B' localizado na entrada do duto são apresentadas as trajetórias F_1 , F_2 e F_3 para as partículas em processo de sedimentação. Como a Trajetória F_1 expressa neste modelo, a velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) para as partículas do sistema, qualquer partícula suspensa com valor de V_s igual ou maior (trajetórias F_2 e F_3) que o valor de V_{CS} , teoricamente será removida no interior do duto.

Considerando as coordenadas X ($x/d = 0$) e Y ($y/d = 1$) no ponto B' e substituindo estes valores nas Equações anteriores, temos, para cada um dos dutos, a seguintes Equações:

Duto do tipo circular;

$$\frac{V_s}{V_o} \cdot (\text{sen}\Theta + \text{cos}\Theta \cdot L) = \frac{4}{3} \quad (33)$$

Duto do tipo canal raso e placa plana paralela;

$$\frac{V_s}{V_o} \cdot (\text{sen}\Theta + \text{cos}\Theta \cdot L) = 1 \quad (34)$$

Yao (1970) também definiu o valor 11/8 do lado direito da Equação 34 para duto do tipo quadrado.

Esses valores foram definidos por Yao (1970) como fator S e correspondem a uma condição crítica na qual a partícula se encontrará posicionada no interior de cada tipo de duto. Assim, as Equações anteriores foram generalizadas na forma da Equação 35:

$$\frac{V_s}{V_o} \cdot (\text{sen}\Theta + \text{cos}\Theta \cdot L) = S \quad (35)$$

Rearranjando a Equação 35 e considerando $V_s = V_{cs}$ é possível determinar o comprimento relativo (L) necessário para a sedimentação das partículas no interior do duto:

$$L = \frac{(S \cdot V_o) - (V_{cs} \cdot \text{Sen}\Theta)}{(V_{cs} \cdot \text{Cos}\Theta)} \quad (36)$$

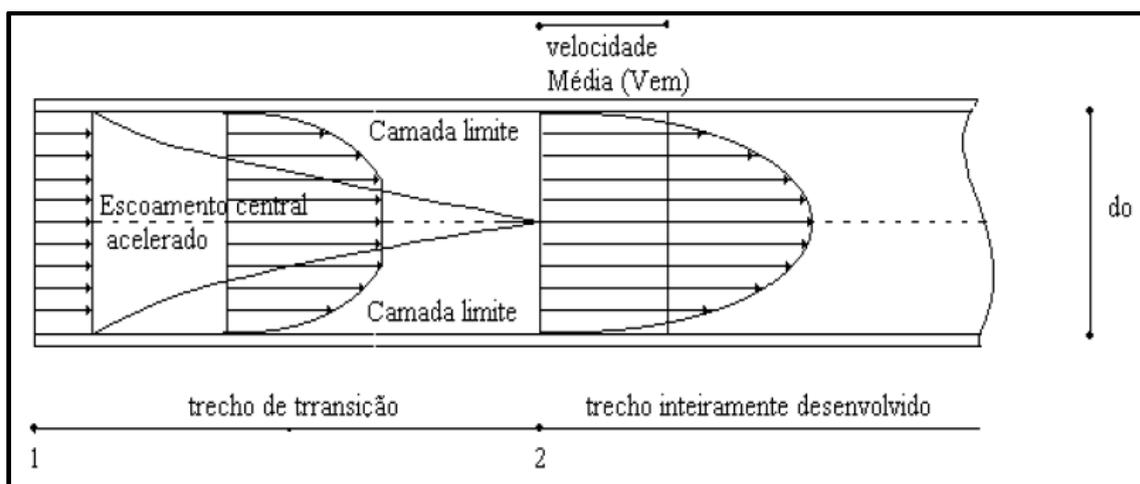
Yao (1970) recomenda que seja adicionado ao valor de L necessário para a sedimentação das partículas, um comprimento relativo necessário para mudança de regime na entrada do duto, denominado de comprimento relativo de transição (L_s). Assim, o comprimento relativo total (L_t) a ser considerado no projeto do sedimentador fica definido pela Equação 37:

$$L_t = L + L_s \quad (37)$$

Na Figura 8, é apresentado um duto genérico com a representação dos trechos de transição e de perfil de velocidade totalmente desenvolvido. Assim, sendo permanente o escoamento de um fluido na direção longitudinal no interior de um determinado duto, consideram-se duas regiões (ALCÓCER et al., 2000):

- a) O trecho a jusante da seção de entrada, denominado trecho de transição ou trecho de estabelecimento do escoamento, no qual a forma do perfil de velocidades varia de seção para seção, tendendo assintoticamente para uma forma definida que caracteriza a região seguinte;
- b) O segundo trecho, que se inicia no final do trecho de transição, denominado trecho com perfil de velocidade totalmente desenvolvido, no qual a forma do perfil de velocidades não muda de seção para seção.

Figura 8 – Representação esquemática do perfil de velocidades no interior de um duto



Fonte: Alcócer et ali (2000)

No trecho de transição, Alcócer et al. (2000) descrevem que podem ser definidas ainda duas sub-regiões: uma de camada limite, cuja espessura cresce até ocupar toda a seção do tubo, e outra na qual a velocidade é uniforme em cada seção, chamada núcleo potencial. Na camada limite ocorrem os fenômenos de cisalhamento entre a parede do duto e também entre as diferentes camadas de fluido. No núcleo potencial há aceleração do escoamento, sendo constante a vazão quando se tem escoamento incompressível.

O L_s , referente à região no interior do duto onde ocorre a mudança de regime de escoamento de turbulento para laminar, de acordo com Saady (2011) pode ser determinado através da analogia matemática definida como Equação de Langhaar, apresentada por Di Bernardo e Schulz (1991) na forma da Equação 38:

$$L_s = C \cdot Re \quad (38)$$

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), através do uso da Equação de Langhaar, o valor de L_s pode ser determinado em função do valor de Re para o regime de escoamento no interior do duto e do valor do Coeficiente C que depende da geometria do mesmo.

Na maioria das situações práticas de escoamento no interior de dutos, as faixas de valores de Re e seus respectivos perfis de movimento são definidos por Bistafa (2010) como sendo:

- $Re < 2.300$, caracterizando perfil de movimento laminar;
- $2.300 < Re < 4.000$, caracterizando perfil de movimento de transição;
- $Re > 4.000$, caracterizando perfil de movimento turbulento.

O valor de Re , conforme descrito por Azevedo Netto et al. (1998), leva em consideração a velocidade (V) e a viscosidade cinemática (ν) do fluido que escoar, bem como, o material que o envolve na forma de uma dimensão linear típica, que para seções não-circulares é denominado de raio hidráulico (R_H). Nesta situação de escoamento, o valor de Re pode ser determinado utilizando a Equação 39:

$$Re = \frac{4 \cdot R_H \cdot V}{\nu} \quad (39)$$

Porem, de acordo com Richter (2009), para não ocorrer a ressuspensão e arraste de partículas floculentas depositadas no interior do duto, a V_{CS} deverá ser inferior a relação dada através da Equação 40:

$$V_{CS} \leq \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Onde;

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_H \cdot J \quad (41)$$

A perda de carga unitária (J) pode ser expressa na forma da Equação 42:

$$J = \frac{f}{(4 \cdot R_H)} \cdot \frac{V_O^2}{(2 \cdot g)} \quad (42)$$

Combinando essas expressões matemáticas é possível reescrever a Equação 40 como:

$$V_{CS} \leq \frac{f}{8} \cdot V_O^2 \quad (43)$$

Assumindo V_O como um valor crítico de velocidade longitudinal máxima ($V_{O \text{ máx}}$) de escoamento e considerando o fator de atrito de Fanning (f) para um sistema de sedimentação em condição de escoamento laminar ($f = 64/Re$), a Equação 41 fica:

$$V_{O \text{ máx}} \leq \sqrt{\frac{Re}{8}} \cdot V_{CS} \quad (44)$$

Assim, através da Equação 44, é possível identificar a $V_{O \text{ máx}}$, necessária para evitar o arrasto de flocos depositados no interior dos dutos e que deverá ser respeitada no projeto e dimensionamento do módulo de decantação,

Caso a V_O solicitada na Equação 36 para determinação do L seja superior a um determinado valor crítico de $V_{O \text{ máx}}$, resultante das condições de regime de escoamento no interior dos dutos e da V_{CS} adotada para o projeto, os flocos depositados durante a etapa de decantação serão ressuspensos e arrastados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Roteiro de cálculo para dimensionamento do módulo de decantação do tipo placa plana paralela

A sequência de cálculos efetuados no dimensionamento e projeto do módulo de decantação foi realizada de maneira a atender o tratamento e clarificação de 20 m³/h de efluente bruto proveniente de lavador de gases industriais, gerados em processo metalúrgico de fusão.

Conforme apresentado na Figura 9, na Etapa 1 foram identificadas as condições operacionais do sistema de tratamento químico (STQ) da ETE. Ainda nesta etapa, a partir dos dados de projeto existentes, foram identificadas as dimensões geométricas do silo de decantação (SD) e do módulo de decantação (AMD) em uso no sistema de decantação lamelar (SDL), com a realização ainda, de um diagnóstico das condições operacionais do AMD durante a clarificação do efluente bruto.

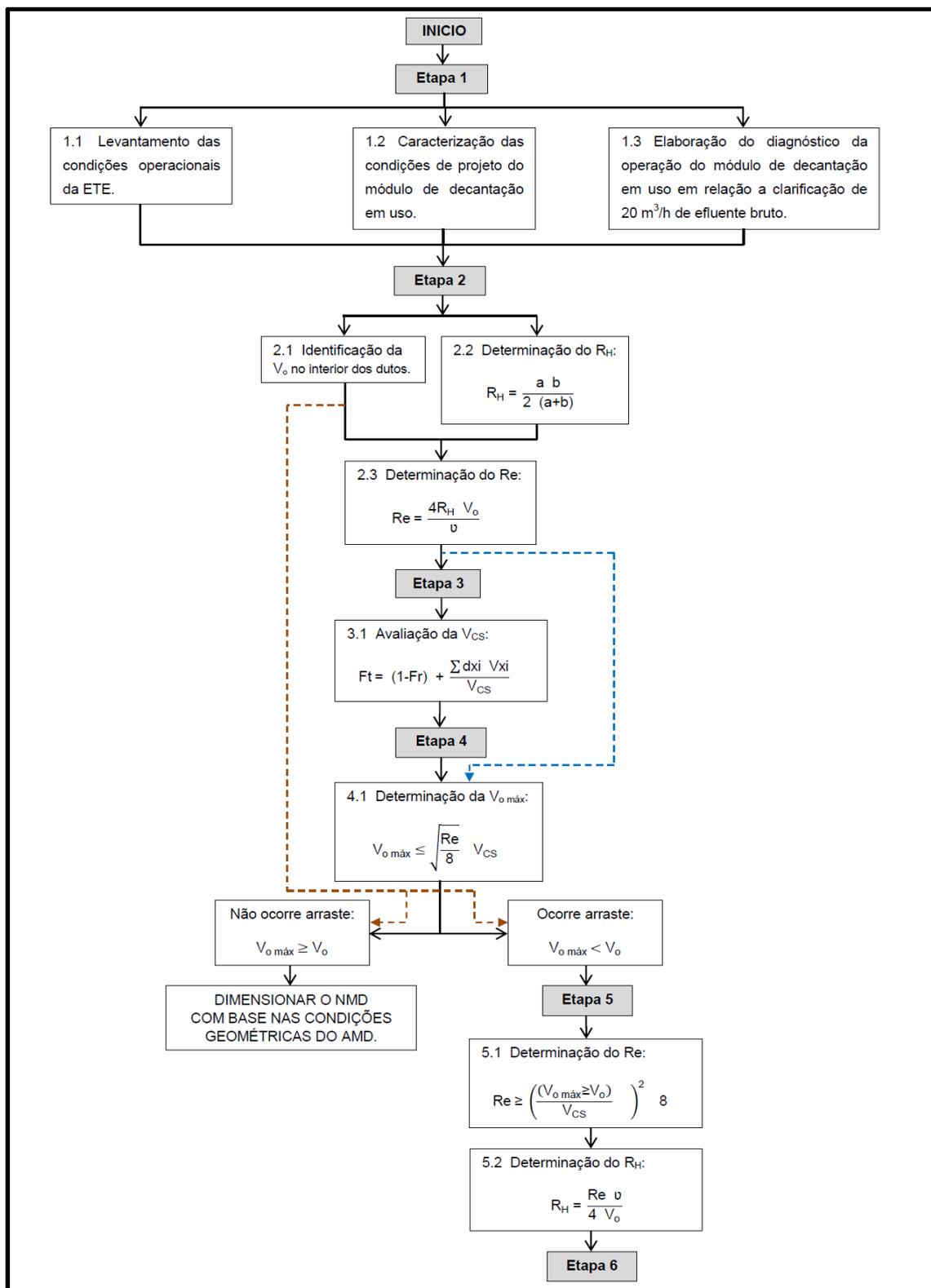
Na Etapa 2 foi realizado um diagnóstico das condições de escoamento no interior dos dutos do AMD, com a determinação dos respectivos valores de V_0 , R_H e Re . Então, conforme sugerido por Richter e Schuchardt (1989), o valor de V_0 foi calculado considerando a vazão de projeto (Q) e a área superficial útil normal ao fluxo (A_0) proporcionada por cada duto do AMD.

O valor de R_H foi determinado considerando o diâmetro real (d) do duto como sendo a largura de seção (a) e a largura interna da lamela como sendo o comprimento de seção (b) do duto. Este valor de R_H foi obtido empregando a Equação 45 proposta por Vargas et al. (2004):

$$R_H = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a+b)} \quad (45)$$

O valor de Re no interior de cada duto do AMD foi obtido empregando a Equação 39 e considerando o R_H determinado através da Equação 45.

Figura 9 – Fluxograma das atividades desenvolvidas e dos cálculos realizados para projeto e instalação do módulo de decantação lamelar



Em continuidade ao fluxograma apresentado na Figura 9, na Etapa 3, através de ensaio em coluna de sedimentação (ECS) apresentado no item 3.2, foi avaliada TAS na condição mínima de dosagem de coagulante e floculante praticada no STQ da ETE, com amostras de efluente bruto que apresentaram diferentes valores de turbidez (S_0)

Na Etapa 4, em função das condições de escoamento e do valor de TAS que foram obtidos respectivamente na Etapa 2 e 3, foi determinado empregando a Equação 44, o valor de $V_{O \text{ máx}}$ a ser respeitada no interior de cada duto do AMD para evitar a ressuspensão e o arraste teórico de flocos. Nessa etapa, foram comparados os valores de V_O e $V_{O \text{ máx}}$ obtidos no AMD e verificado se havia ou não a necessidade de redimensionamento deste dispositivo em atendimento a condição crítica de projeto estabelecida.

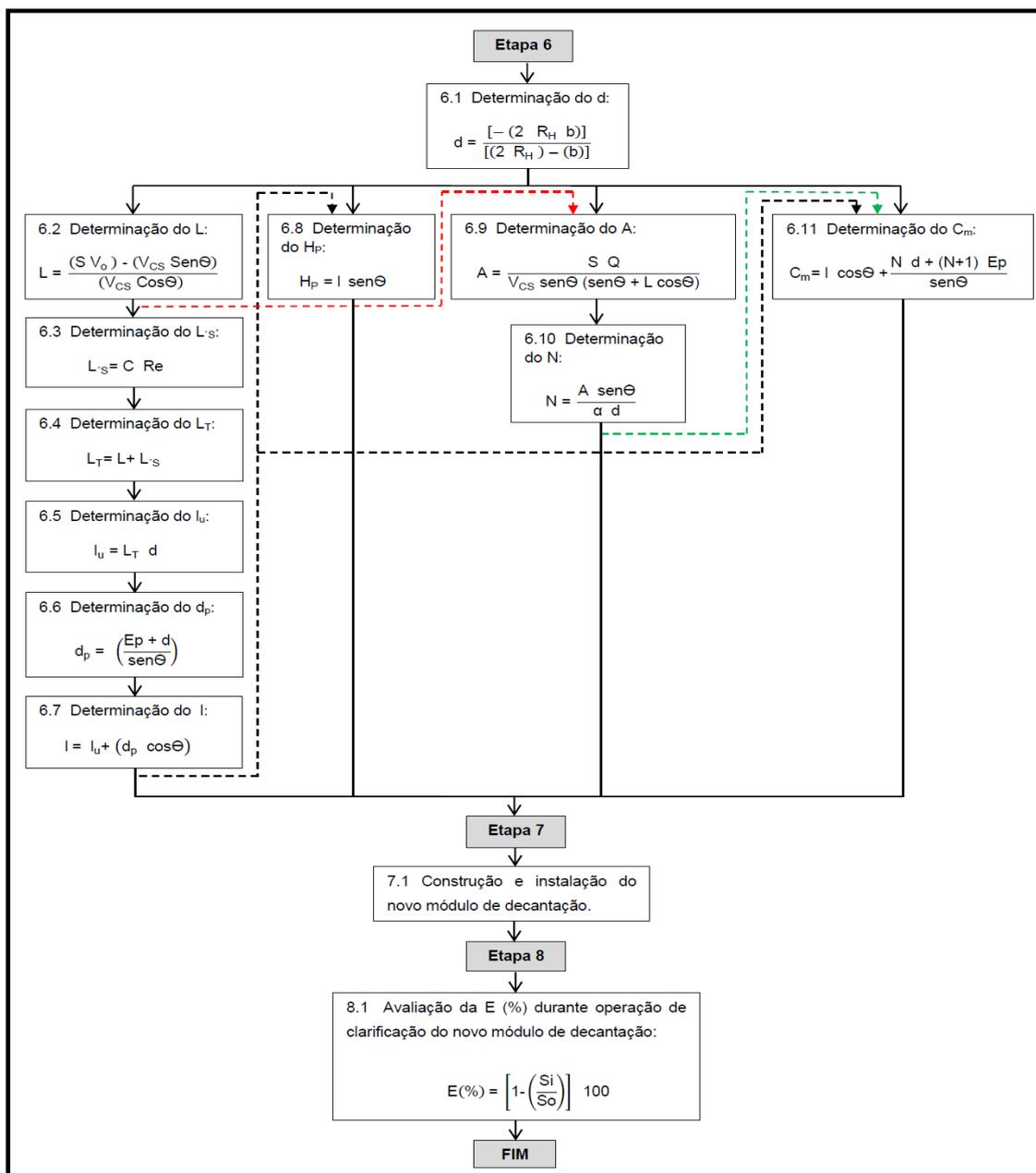
Como foi verificada a necessidade de redimensionamento do módulo de decantação em atendimento a TAS definida para o projeto, foram realizados a partir da Etapa 5, os cálculos necessários para a elaboração do projeto do novo módulo de decantação (NMD). Então, adotando um valor de $V_{O \text{ máx}}$ superior ou igual a V_O para evitar a ressuspensão e arraste teórico de flocos para a V_{CS} definida no ECS, foi determinado o valor de Re mínimo a ser considerado no interior dos dutos do AMD, empregando a Equação 44 adaptada na forma de:

$$Re \geq 8 \cdot \left(\frac{(V_{O \text{ máx}} \geq V_O)}{V_{CS}} \right)^2 \quad (44)$$

Ainda na Etapa 5, a partir do valor de Re determinado através da Equação 44 e adotando o valor de $V_{O \text{ máx}}$ superior ou igual ao valor de V_O , foi definido através da Equação 39, o valor de R_H a ser considerado no interior de cada duto do AMD.

Conforme apresentado na Figura 10, na Etapa 6 foi calculado inicialmente, o valor de diâmetro real (d) empregando a Equação 45, considerando o valor de R_H obtido na Equação 39 e o valor de largura interna útil do SD como sendo o valor de b para o duto no NMD.

Figura 10 – Fluxograma das atividades desenvolvidas e dos cálculos realizados para projeto e instalação do módulo de decantação lamelar (continuação)



Com base no valor de d para os dutos, foram determinados em função do valor de Θ , os respectivos valores de comprimento útil (l_U) de placas, afastamento entre placas (d_P), comprimento real (l) de placas, altura de placas (H_P), número de dutos (N) e comprimento de módulo (C_m), necessários para a construção e instalação do NMD no interior do SD.

Para determinar o valor de l_U , foi preciso inicialmente determinar os valores de L , L_S e L_t .

O valor de L foi determinado através da Equação 36, em função do Θ dos dutos e considerando ainda, o valor de V_O adotada para o projeto, o valor de V_{CS} definida através do ECS e o valor do fator S .

O valor de L_S foi determinado através da Equação 38, considerando o coeficiente C adotado em função do tipo de geometria do duto e o valor de R_e determinado através da Equação 44.

O valor de L_t foi determinado através da Equação 37, considerando o valor de L_S que foi obtido através da Equação 38 e o valor de L que foi obtido através da Equação 36 em função do valor de Θ dos dutos.

O valor de l_U foi definido considerando o L_t obtido através da Equação 37 e o valor de d obtido através da Equação 45. O valor de l_U foi determinado através da Equação 46, porém adaptada através de analogia descrita no item 5.10.3.2 da NBR 12216/1992 na forma de:

$$l_U = L_t \cdot d \quad (46)$$

O valor de d_P foi determinado em função do valor de Θ dos dutos e considerando ainda, o valor de d obtido através da Equação 45 e o valor de espessura da placa (E_P) de 10 mm, por ser o valor de E_P mais comum comercializado. O valor de d_P foi obtido empregando a Equação 47 adaptada de Richter e Schuchardt (1989) na forma de:

$$d_P = \left(\frac{E_P + d}{\text{sen}\Theta} \right) \quad (47)$$

O valor de I foi determinado em função do valor do Θ dos dutos e considerando ainda, o valor de I_U obtido através da Equação 46 e o valor d_p obtido através da Equação 47. O valor de I foi obtido empregando a Equação 48, apresentada por Richter e Schuchardt (1989), porém adapta na forma de:

$$I = I_U + (d_p \cdot \cos\Theta) \quad (48)$$

O valor H_p foi determinado em função do valor do Θ dos dutos, considerando o valor I obtido através da Equação 48. O valor para H_p foi obtido empregando a Equação 49, porém adaptada a partir da analogia descrita por Leme (1990) na forma de:

$$H_p = I \cdot \text{sen}\Theta \quad (49)$$

A área superficial útil (A) necessária para sedimentação das partículas flocculentas foi determinada em função do valor do Θ dos dutos e considerando ainda, o fator S adotado para o tipo de duto, o valor de Q do projeto, o valor de V_{CS} definida no ECS, além do valor L obtido através da Equação 36. O valor de A foi obtido através da Equação 50, apresentada por Richter e Azevedo Netto (1991) na forma de:

$$A = \frac{S \cdot Q}{V_{CS} \cdot \text{sen}\Theta \cdot (\text{sen}\Theta + L \cdot \cos\Theta)} \quad (50)$$

O valor de N foi determinado em função do valor do Θ dos dutos e considerando ainda, o valor de A obtido através da Equação 50, o valor de largura (α) adotada para a placa e o valor de d obtido através da Equação 45. O valor de N foi obtido empregando a Equação 51, apresentada por Richter e Schuchardt (1989) na forma de:

$$N = \frac{A \cdot \text{sen}\Theta}{\alpha \cdot d} \quad (51)$$

O C_m foi determinado em função do valor do Θ dos dutos e considerando ainda, o valor de l obtido através da Equação 48, o valor de E_p de 10 mm, o valor de d obtido através da Equação 45 e o valor de N obtido através da Equação 51. O valor de C_m foi obtido empregando a Equação 52, apresentada por Richter e Schuchardt (1989) na forma de:

$$C_m = l \cdot \cos\Theta + \frac{N \cdot d + (N+1) \cdot E_p}{\sin\Theta} \quad (52)$$

Na Etapa 7, após a definição das medidas geométricas para o projeto, o NMD foi construído e instalado no interior do SD.

Na Etapa 8, o NMD foi colocado em operação em substituição ao AMD que vinha sendo utilizado na ETE. Após o ajuste das condições operacionais do STQ e SDL, foi avaliada a eficiência operacional do NMD conforme explicado no item 3.3.

3.2 Ensaio em coluna de sedimentação (ECS): Determinação da taxa de aplicação superficial (TAS) a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD)

O valor da taxa de aplicação superficial (TAS) a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD) na condição mínima de dosagem de reagentes químicos, foi determinado através de ensaio em coluna de sedimentação (ECS), idealizado com base no procedimento realizado por Von Sperling (1996) para avaliação da V_s a partir de resultados finais de sólidos suspensos totais. Porém, este ensaio foi realizado com base nos resultados finais de turbidez, pois conforme Di Bernardo e Dantas (2005), a avaliação da V_s em ECS pode também ser realizada em função dos resultados finais deste parâmetro.

Conforme apresentado no desenho do Apêndice A, a coluna de sedimentação utilizada no ECS foi confeccionada em tubo de PVC soldável de 110 mm de diâmetro interno e com uma altura útil (h_u) de 440 cm.

Para introdução do volume de efluente coagulado e floculado dentro do dispositivo, a coluna foi construída com uma tomada lateral composta por uma válvula esfera de PVC soldável de $\frac{3}{4}$ ". Para realizar a coleta de amostras, a coluna de sedimentação possui quatro outras válvulas de esferas localizadas nas profundidades de h_1 de 200, h_2 de 270, h_3 de 340 e h_L de 410 cm. Esta última para retirada de sedimentos.

O ECS foi realizado da seguinte forma:

- 1º. Após a coluna ser completamente preenchida em sua altura útil com efluente coagulado e floculado, foi dado início ao ensaio de sedimentação.
- 2º. Nos tempos de ensaio de t_{e1} de 30 minutos, t_{e2} de 40 minutos e t_{e3} de 50 minutos, foram coletados simultaneamente alíquotas de 150 ml de amostra efluente nas tomadas laterais localizadas nas profundidades h_1 , h_2 e h_3 .
- 3º. Em cada alíquota coletada, foi determinado o valor de turbidez remanescente (S_i) através de turbidímetro marca HACH modelo 2100P, seguindo o método Standard Methods 21^a - Edição 2130 B.
- 4º. Para cada resultado de S_i obtido em h_1 , h_2 e h_3 durante t_{e1} , t_{e2} e t_{e3} de ensaio, foi determinada a sua fração (Fr) em relação ao valor de turbidez (S_0) do efluente bruto. Esta Fr é referente a uma determinada V_S , que foi obtida através da relação de h_1 , h_2 e h_3 , em cada tempo de ensaio.
- 5º. Com base nos resultados de Fr e nas suas respectivas V_S , foi construído um gráfico de Fr em função de V_S , onde os pontos plotados originaram uma curva de sedimentação característica para as partículas presentes na suspensão.
- 6º. Após a construção desta curva de sedimentação, foi adotada uma determinada V_{CS} , que com referência a esta curva, correspondeu a uma determinada Fr no eixo Y do gráfico. Assim, para cada V_{CS} adotada e avaliada, foi obtida uma remoção parcial para as partículas presentes na suspensão fazendo $1-Fr$.

- 7º. Além da remoção parcial para as partículas presentes na suspensão, existiram outras Fr referentes a partículas que não iniciaram a sedimentação no topo da coluna, mas que apesar de possuírem uma V_S inferior a V_{CS} adotada no ensaio, poderiam estar sendo removidas no mesmo instante. Estas outras Fr que poderiam estar sendo removidas estariam ocupando a área formada entre o eixo Y e a curva característica da suspensão. Para o cálculo desta área, foi feito inicialmente a divisão do eixo Y em faixas com largura média (dx_i). O valor médio de cada faixa com dx_i , tendo como referência a curva de sedimentação, correspondeu a uma velocidade média de sedimentação (V_{xi}) no eixo das V_S . Para o cálculo da área de cada faixa com dx_i , foi realizado fazendo $dx_i \cdot V_{xi}$, assim, a determinação da área total ocupada por estas outras frações de partículas, foi determinada fazendo $\sum dx_i \cdot V_{xi}$.
- 8º. A partir dos resultados de $1-F_r$ e $\sum dx_i \cdot V_{xi}$, para determinar a fração total (F_t) de partículas removidas a cada V_{CS} foi empregada a Equação 53:

$$F_t = (1-F_r) + \frac{\sum dx_i \cdot V_{xi}}{V_{CS}} \quad (53)$$

3.3 Avaliação da eficiência (E (%)) de remoção de turbidez do novo módulo de decantação (NMD)

A E (%) do NMD foi determinada empregando a Q de 20 m³/h e um valor de frequência de funcionamento das bombas dosadoras de coagulante e floculante de 20 Hz. Através do uso de turbidímetro marca HACH modelo 2100P e seguindo o Standard Methods 21^a - Edição 2130 B, foi determinado o valor médio de S_o no efluente bruto e os valores de S_i no efluente clarificado na saída do SD. Para determinação da E (%), foi empregada a analogia proposta por Oliveira (2008), adaptada na forma da Equação 54:

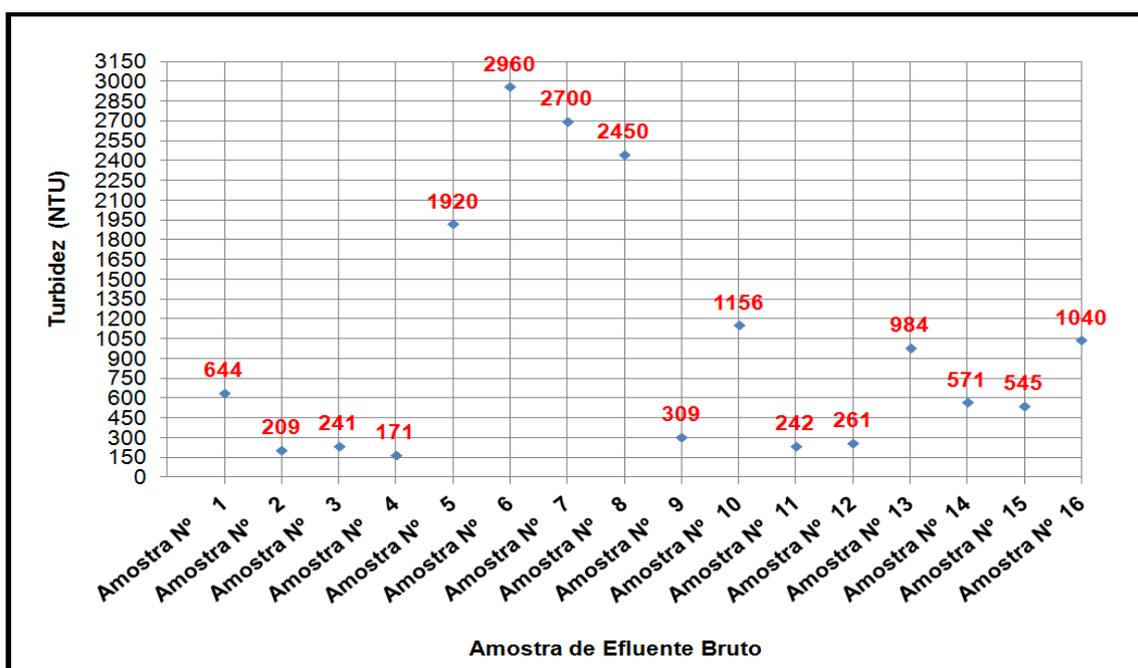
$$E(\%) = \left[1 - \left(\frac{S_i}{S_o} \right) \right] \cdot 100 \quad (54)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Etapa 1 – Identificação dos parâmetros de controle do sistema de tratamento químico (STQ) e diagnóstico das condições geométricas de projeto e de operação do antigo módulo de decantação (AMD)

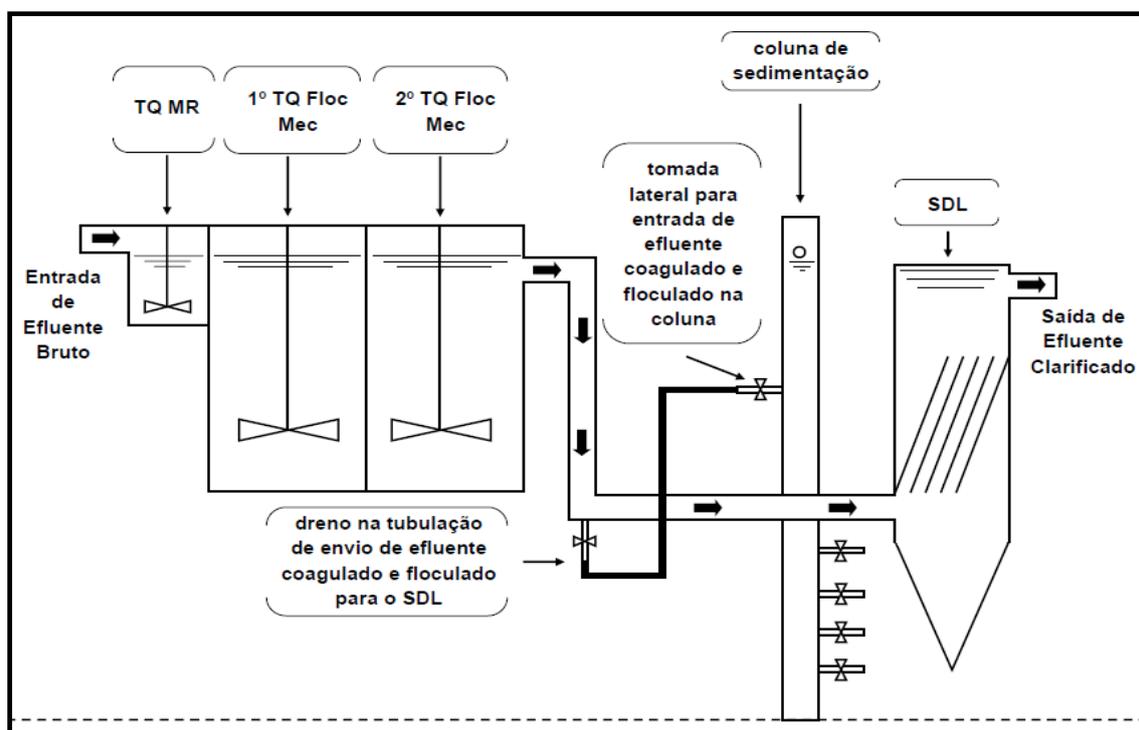
A ETE foi projetada para realizar sob uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, o tratamento da corrente de efluente bruto gerado durante a lavagem de gases industriais provenientes do processo produtivo de fusão, que em função do material particulado removido por este sistema, possui em sua composição; hidróxidos metálicos; sais metálicos dissolvidos; sólidos sedimentáveis e em suspensão, que ocasionam conforme apresentado no Gráfico 1, em elevados e variados valores de S_0 .

Gráfico 1 – Valores médios de turbidez (S_0), presentes na composição de amostras de efluente bruto, recebidos diariamente para tratamento na ETE



Conforme o fluxo de processo apresentado na Figura 11, o STQ da ETE é composto por um tanque para coagulação em mistura rápida (TQ MR) e dois tanques para floculação mecânica (TQ Floc Mec), que antecedem um sistema de decantação lamelar (SDL). Ainda nesta unidade, foi instalada uma coluna de sedimentação na linha de tubulação de envio de efluente coagulado e floculado para o SDL, para avaliar as dosagens de reagentes químicos empregados no tratamento.

Figura 11 – Fluxo do processo da ETE



Referente ao STQ são apresentadas no Quadro 1, as informações de TDH e gradientes de velocidade (G) proporcionados pelos agitadores instalados nos tanques TQ MR e TQ Floc Mec, durante a etapa de coagulação e floculação de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ de efluente bruto.

Quadro 1 – Tempo de detenção hidráulico (TDH) e gradientes de velocidade (G) nos tanques de mistura rápida (TQ MR) e floculação mecânica (TQ Floc Mec) da ETE

Q (m ³ /h)	TQ MR		1º TQ Floc Mec		2º TQ Floc Mec	
	TDH (seg)	G (s ⁻¹)	TDH (min)	G (s ⁻¹)	TDH (min)	G (s ⁻¹)
20	40	790	12,5	50	12,5	20

O agente coagulante utilizado para na etapa de coagulação do STQ é o Tanfloc. De acordo com TANAC S/A (2003), a vantagem de utilizar este produto, é que o mesmo não consome alcalinidade do meio onde atua, não alterando desta maneira, o pH do efluente bruto recebido para tratamento na ETE, cujos valores variam de 6,5 a 8,0. Assim, diferente dos demais coagulantes inorgânicos, como por exemplo, o cloreto férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), utilizando este produto não é preciso realizar a dosagem adicional de agentes neutralizantes como a soda cáustica (NaOH), para compensar o déficit de alcalinidade consumida do meio para a produção dos hidróxidos metálicos necessários para a formação dos coágulos e flocos.

Durante a etapa de floculação no STQ, é utilizado o agente floculante Nalcolyte 4684. Na ETE, este produto é utilizado combinado com o Tanfloc, pois conforme verificado com Macêdo (2001), os agentes floculantes são produtos que quando utilizados combinados com os agentes coagulantes, propiciam aumento de tamanho dos flocos formados na etapa de floculação, ocasionando assim, aumento de sua respectiva V_s .

Referente ao sistema de dosagem do STQ, são apresentadas no Quadro 2, as concentrações de dosagem (g/m³) de Tanfloc e Nalcolyte 4684 sob uma Q de 20 m³/h, em função da frequência de funcionamento (Hz) das bombas dosadoras.

Quadro 2 – Frequência de funcionamento (Hz) das bombas dosadoras de Tanfloc e Nalcolyte 4684 e suas respectivas concentrações (g/m^3) de dosagem sob a vazão operacional (Q) de $20 \text{ m}^3/\text{h}$

TANFLOC			NALCOLYTE 4684		
Hz	g/h	g/m^3	Hz	g/h	g/m^3
20	23,46	1,17	20	62,31	3,12
25	29,33	1,47	25	77,88	3,89
30	35,19	1,76	30	93,46	4,67
35	41,06	2,05	35	109,04	5,45
40	46,93	2,35	40	124,61	6,23
45	52,79	2,64	45	140,19	7,01
50	58,66	2,93	50	155,77	7,79
55	64,52	3,23	55	171,34	8,57
60	70,39	3,52	60	186,92	9,35

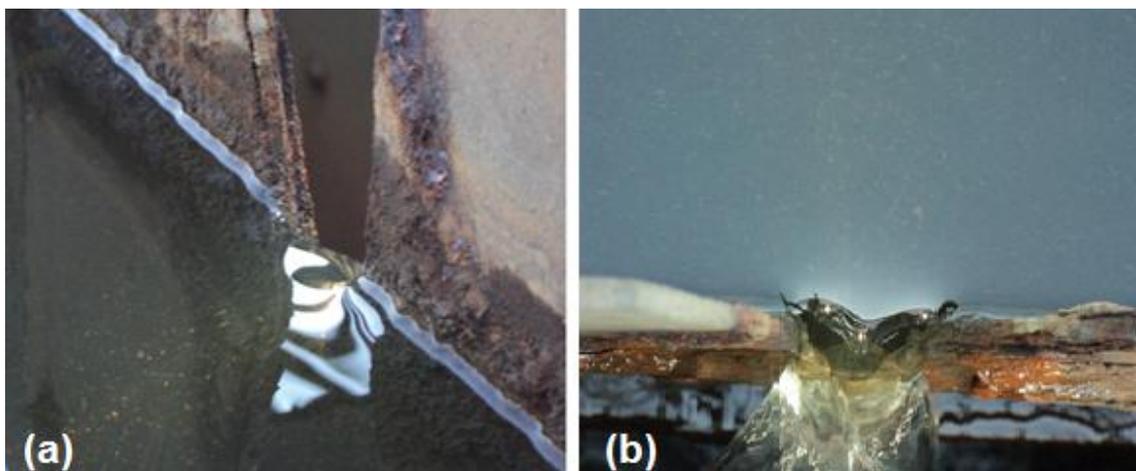
No sistema de decantação lamelar (SDL), o módulo de decantação (AMD) que vinha sendo empregado era do tipo placa plana paralela. Este dispositivo estava instalado no interior de um silo de decantação (SD), cujas dimensões de projeto são apresentadas no Apêndice B.

O AMD apresentava um comprimento (C_{AMD}) de 2283 mm, largura externa (b_{eAMD}) de 1720 mm, altura (H_{AMD}) de 866 mm. Este dispositivo, era composto por 27 placas de polipropileno, que apresentavam espessura (E_{AMD}) de 10 mm, comprimento real (l_{PAMD}) de 1000 mm, largura (b_{PAMD}) de 1700,9 mm, além de serem sido instaladas com um valor de Θ de 60° .

Em função dessas características, o AMD oferecia para sedimentação das partículas floculentas, um número (N^o_{AMD}) de 26 dutos, com diâmetro (d_{AMD}) de 49 mm, largura (b_{AMD}) de 1700,9 mm e comprimento (l_{AMD}) de 1000 mm, resultando assim, em um tempo de detenção hidráulica (TDH_{AMD}) de aproximadamente 6,5 min, quando praticada na ETE uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

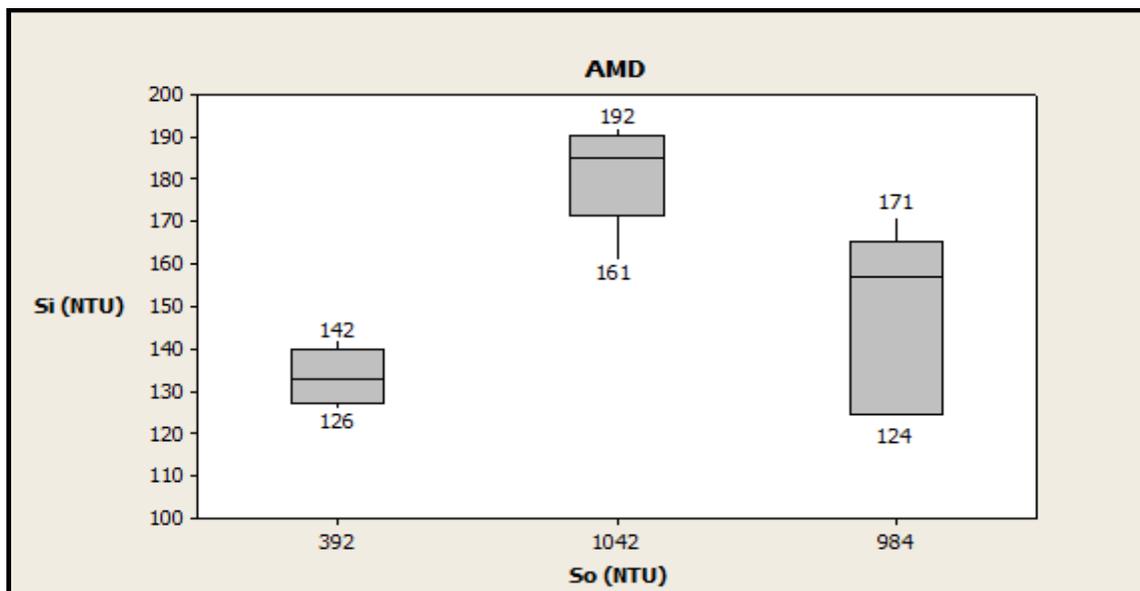
Conforme demonstrado na Figura 12, durante a operação de clarificação das correntes de efluente bruto com o AMD, era observado elevado arraste de flocos no vertedor de saída de efluente do SD.

Figura 12 – Arraste de flocos no vertedor (vista superior interna (a) e vista superior externa (b)) de saída de efluente do silo de decantação (SD)



No Gráfico 2 são apresentados alguns valores limites de S_i obtidos durante operação do AMD, quando praticada a frequência de funcionamento de 20 Hz para as bombas dosadoras de reagentes químicos no STQ sob uma Q de 20 m³/h.

Gráfico 2 – Valores limites de turbidez remanescente (S_i) obtidos durante a operação do antigo módulo de decantação (AMD)



4.2 Etapa 2 – Diagnóstico das condições de escoamento no interior dos dutos do antigo módulo de decantação (AMD)

Como cada duto do AMD apresentou d_{AMD} de 49 mm e b_{AMD} de 1700,9 mm, foi identificado um valor de A_o de $0,0833 \text{ m}^2$. Como o AMD apresentava 26 dutos, foi identificado um valor de A_o total de $2,167 \text{ m}^2$. Então, considerando o valor de A_o de $2,167 \text{ m}^2$ e a Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, foi determinado um valor de V_o no interior dos dutos do AMD de $9,23 \text{ m/h}$.

Considerando o valor de d_{AMD} de 49 mm como sendo a largura de seção (a) de duto e o valor de b_{AMD} de 1700,9 mm como sendo o comprimento de seção (b) de duto, foi determinado através da Equação 45 um valor de R_H de 23,81 mm para cada duto no interior do AMD.

Com referência ao valor de R_H de 23,81 mm e considerando o valor de V_o de $9,23 \text{ m/h}$ e o valor de ν da água a 20°C de $0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$, foi determinado através da Equação 39 o valor de Re de aproximadamente 244,20, caracterizando assim, um regime de escoamento laminar no interior dos dutos do AMD.

4.3 Etapa 3 – Ensaio em coluna de sedimentação (ECS): Determinação da taxa de aplicação superficial (TAS) a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD)

Para avaliar a TAS na condição mínima de dosagem de reagentes químicos no STQ, foram realizados 03 ECS com correntes de efluente bruto, que apresentaram diferentes valores de S_0 .

As correntes de efluente bruto testadas no primeiro, segundo e terceiro ensaio, apresentaram respectivamente o valor médio de S_0 de 984 NTU, 644 NTU e 241 NTU. Em ambos os ECS, sob uma Q de 20 m³/h, o efluente bruto foi previamente coagulado e floculado no próprio STQ da ETE, respeitando os valores de G e TDH apresentados no Quadro 1, praticando um valor de 20 Hz para as bombas dosadoras de Tanfloc e Nalcolyte 4684. Em cada ensaio, após a coluna de sedimentação estar completamente preenchida com efluente bruto coagulado e floculado, foram coletadas simultaneamente nos 03 pontos de amostragem da coluna, alíquotas de 150 ml de amostra, no t_{e1} de 30 minutos, t_{e2} de 40 minutos e t_{e3} de 50 minutos. Conforme apresentado na Tabela 1, 2 e 3, cada valor de Fr de turbidez correspondeu a um valor de V_s , dada pela razão entre a h ($h_1/h_2/h_3$) de coleta e o t ($t_{e1}/t_{e2}/t_{e3}$) no momento da amostragem.

Tabela 1 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU

Ponto de Coleta	h (cm)	t (min)	V_s (m/h)	S_0 (NTU)	S_i (NTU)	Fr (S_i/S_0)
h_1	200	30	4,00	984,00	22,40	0,023
	200	40	3,00	984,00	28,40	0,029
	200	50	2,40	984,00	21,10	0,021
h_2	270	30	5,40	984,00	84,10	0,085
	270	40	4,05	984,00	41,00	0,042
	270	50	3,24	984,00	23,80	0,024
h_3	340	30	6,80	984,00	334,00	0,339
	340	40	5,10	984,00	65,20	0,066
	340	50	4,08	984,00	26,60	0,027

Tabela 2 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU

Ponto de Coleta	h (cm)	t (min)	V_s (m/h)	S_0 (NTU)	S_i (NTU)	Fr (S_i/S_0)
h ₁	200	30	4,00	644,00	17,40	0,027
	200	40	3,00	644,00	15,80	0,025
	200	50	2,40	644,00	14,20	0,022
h ₂	270	30	5,40	644,00	22,30	0,035
	270	40	4,05	644,00	19,80	0,031
	270	50	3,24	644,00	15,70	0,024
h ₃	340	30	6,80	644,00	24,30	0,038
	340	40	5,10	644,00	25,90	0,040
	340	50	4,08	644,00	21,80	0,034

Tabela 3 – Resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente, obtidos após ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU

Ponto de Coleta	h (cm)	t (min)	V_s (m/h)	S_0 (NTU)	S_i (NTU)	Fr (S_i/S_0)
h ₁	200	30	4,00	241,00	12,60	0,052
	200	40	3,00	241,00	10,10	0,042
	200	50	2,40	241,00	11,00	0,046
h ₂	270	30	5,40	241,00	12,20	0,051
	270	40	4,05	241,00	19,80	0,082
	270	50	3,24	241,00	11,40	0,047
h ₃	340	30	6,80	241,00	13,80	0,057
	340	40	5,10	241,00	13,30	0,055
	340	50	4,08	241,00	11,20	0,046

Com base nos resultados de Fr de turbidez, foi construído para cada ECS, um gráfico de Fr em função da V_s , cujos pontos obtidos originaram uma curva. As curvas referentes aos ensaios da Tabela 3, 4 e 5 são apresentadas, respectivamente nos Gráficos 3, 4 e 5 do Apêndice C.

Não existe em bibliografia, a definição de um valor específico de TAS a ser considerado no projeto de decantadores laminares, ficando assim a critério do projetista, a escolha de um valor que melhor se adeque as características de sedimentabilidade para os flocos produzidos na etapa de dosagem de produtos químicos e no grau de controle da futura unidade de tratamento, quando em atendimento a uma determinada Q.

A NBR 12216/1992 especifica valores de TAS que variam de 25 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a 40 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, indicando um valor exato para este parâmetro em função da Q da futura unidade de tratamento e em função do nível de controle operacional definida para a mesma. Então, como a ETE foi projetada para atender uma Q de 20 m^3/h , com o uso de um sistema automatizado de inversores de frequência para controle de valores de G e Hz, foi verificado na NBR 12216/1992, que para esta condição de nível de controle operacional poderia ser considerado para este projeto um valor de TAS de 25 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Porém, este valor de TAS de 25 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ sugerido pela NBR 12216/1992, é um valor muito conservador quando comparando aos valores de TAS citados por Silva (2010), que variam de 57,6 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a 120 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Porém, diferente da NBR 12216/1992, Silva (2010) não especifica em quais condições de operação estes valores de TAS poderiam estar fundamentando o projeto.

Leme (1990) enfatiza que com o progresso da tecnologia de controles operacionais, novos decantadores puderam ser construídos com valores de TAS variando entre 30 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a 65 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Este autor ainda informa que, em grandes estações de tratamento, que apresentam excelentes controles operacionais e que utilizam coagulantes capazes de aumentar a sedimentabilidade de flocos quando necessário, foram construídos decantadores com valores de TAS variando de 40 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a 55 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$,

Levando em consideração o fato de que o projeto do NMD se destina a clarificar o efluente bruto gerado na condição mínima de dosagem de coagulante e floculante, foram adotadas várias TAS, cujos valores variaram de 33,6 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ a 76,8 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Esta faixa de valores de TAS se enquadram nas faixas citadas pelas diferentes bibliografias consultadas, quando na implantação de projeto de decantadores laminares.

Na Tabela 4, são apresentados os valores de TAS com os seus valores correspondentes de V_{CS} , que foram avaliados nos 03 ECS para definição de um valor específico de TAS a ser considerado no projeto do NMD.

Tabela 4 – Taxa de aplicação superficial (TAS) avaliadas no ensaio em coluna de sedimentação (ECS)

TAS AVALIADAS NO ECS										
TAS (m ² / m ² .dia)	76,8	72	67,2	62,4	57,6	52,8	48	43,2	38,4	33,6
Vcs (m/h)	3,2	3	2,8	2,6	2,4	2,2	2	1,8	1,6	1,4

Então, tendo como referência a curva de sedimentação do ensaio realizado com efluente bruto que apresentou a S_0 de 984 NTU, são apresentados nos Gráficos 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, e 15 do Apêndice D, as Fr referentes a cada V_{CS} descritas na Tabela 6 e a divisão em faixas (dx_i) da área formada entre o eixo Y e a curva originada, com a indicação do valor médio de cada faixa com dx_i correspondendo a uma V_{xi} no eixo X.

Os valores médios de cada faixa com dX_i e a sua V_{xi} correspondente, são apresentados na Tabela 5, juntamente com os valores das $dx_i.V_{xi}$ e o valor de $\sum dx_i.V_{xi}$ ocupada pela fração de partículas com V_S inferiores a cada V_{CS} avaliada. Então, com base nos valores de $1-Fr$ e $\sum dx_i.V_{xi}$, para cada V_{CS} avaliada no ensaio, foi determinada através da Equação 53, a F_t e a sua percentagem P ((%) = $F_t .100$) de remoção de partículas.

Tabela 5 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU

Vcs (m/h)	Fr (Si/S0)	1-Fr	dXi	Largura de dXi	Valor Médio em dXi	VXi (m/h)	dXi.Vxi	Σ dXi.Vxi	Ft	P (%)
3,20	0,027	0,9730	0,027 - 0,02	0,007	0,0235	2,4	0,01680	0,03030	0,9825	98,25
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
3,00	0,026	0,9740	0,026 - 0,02	0,006	0,023	2,3	0,01380	0,02730	0,9831	98,31
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
2,80	0,025	0,9750	0,025 - 0,02	0,005	0,0225	2,2	0,01100	0,02450	0,9838	98,38
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
2,60	0,024	0,9760	0,024 - 0,02	0,004	0,022	2,1	0,00840	0,02190	0,9844	98,44
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
2,40	0,023	0,9770	0,023 - 0,02	0,003	0,0215	2,025	0,00608	0,01958	0,9852	98,52
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
2,20	0,022	0,978	0,022 - 0,02	0,002	0,021	1,9	0,00380	0,01730	0,9859	98,59
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
2,00	0,021	0,979	0,021 - 0,02	0,001	0,0205	1,75	0,00175	0,01525	0,9866	98,66
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
1,80	0,02	0,980	0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,075	0,01075	0,01350	0,9875	98,75
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,275	0,00275			
			0,019 - 0,01	0,009	0,0145	1,025	0,00923			
1,60	0,019	0,981	0,01 - 0,00	0,01	0,005	0,275	0,00275	0,01198	0,9885	98,85
			0,0175 - 0,01	0,0075	0,01375	0,95	0,00713			
			0,01 - 0,00	0,01	0,005	0,275	0,00275			
1,40	0,0175	0,983	0,0175 - 0,01	0,0075	0,01375	0,95	0,00713	0,00988	0,9896	98,96
			0,01 - 0,00	0,01	0,005	0,275	0,00275			

Para o ensaio realizado com efluente bruto que apresentou a S_0 de 644 NTU, são apresentados nos Gráficos 16,17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, e 25 do Apêndice E, as Fr referentes a cada V_S descritas na Tabela 7 e a divisão em faixas (dxi) da área formada entre o eixo Y e a curva originada, com a indicação do valor médio de cada faixa com dxi correspondendo a uma Vxi no eixo X.

Os valores médios de cada faixa com dxi e a sua Vxi correspondente, são apresentados na Tabela 6, juntamente com os valores das dxi.Vxi e o valor de Σ dxi.Vxi ocupada pela fração de partículas com V_S inferiores a cada V_{CS} avaliada. Então, com base nos valores de 1-Fr e Σ dxi.Vxi, para cada V_{CS} avaliada no ensaio, foi determinada através da Equação 53, a Ft e a sua P (%) correspondente.

Tabela 6 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU

V_{cs} (m/h)	Fr (S_i/S_0)	1-Fr	dXi	Largura de dXi	Valor Médio em dXi	VXi (m/h)	dXi.Vxi	$\Sigma dXi.Vxi$	Ft	P (%)
3,20	0,025	0,9750	0,025 - 0,02	0,005	0,0225	2,45	0,01225	0,02875	0,9840	98,40
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
3,00	0,024	0,9760	0,024 - 0,02	0,004	0,022	2,35	0,00940	0,02590	0,9846	98,46
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
2,80	0,0235	0,9765	0,0235 - 0,02	0,0035	0,02175	2,3	0,00805	0,02455	0,9853	98,53
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
2,60	0,023	0,9770	0,023 - 0,02	0,003	0,0215	2,25	0,00675	0,02325	0,9859	98,59
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
2,40	0,022	0,9780	0,022 - 0,020	0,002	0,021	2,15	0,00430	0,02080	0,9867	98,67
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
2,20	0,021	0,979	0,021 - 0,02	0,001	0,0205	2,05	0,00205	0,01855	0,9874	98,74
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300			
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
2,00	0,020	0,980	0,02 - 0,01	0,01	0,015	1,3	0,01300	0,01650	0,9883	98,83
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
			0,019 - 0,01	0,009	0,0145	1,2	0,01080			
1,80	0,019	0,981	0,019 - 0,01	0,009	0,0145	1,2	0,01080	0,01430	0,9889	98,89
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
			0,0175 - 0,010	0,0075	0,01375	1,1	0,00825			
1,60	0,0175	0,983	0,0175 - 0,010	0,0075	0,01375	1,1	0,00825	0,01175	0,9898	98,98
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			
			0,016 - 0,010	0,006	0,013	1,05	0,00630			
1,40	0,016	0,984	0,016 - 0,010	0,006	0,013	1,05	0,00630	0,00980	0,9910	99,10
			0,01 - 0	0,01	0,005	0,35	0,00350			

Para o ensaio realizado com efluente bruto que apresentou a S_0 de 241 NTU, são apresentados nos Gráficos 26,27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, e 35 do Apêndice F, as Fr referentes a cada V_S descritas na Tabela 7 e a divisão em faixas (dxi) da área formada entre o eixo Y e a curva originada, com a indicação do valor médio de cada faixa com dxi correspondendo a uma Vxi no eixo X.

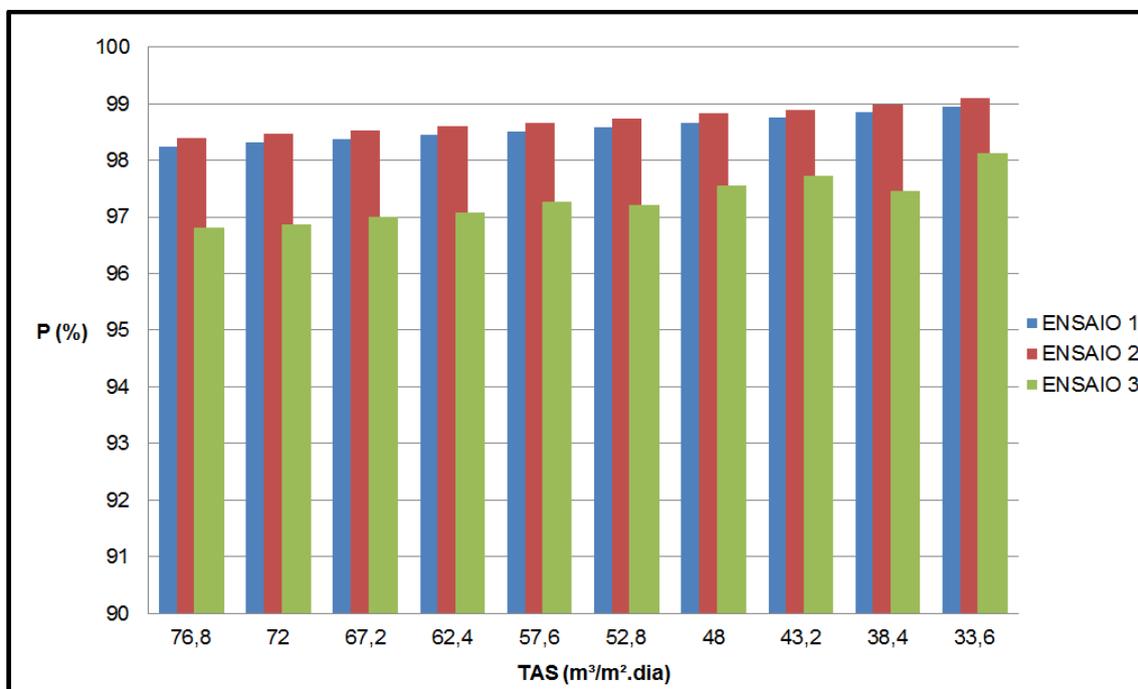
Os valores médios de cada faixa com dxi e a sua Vxi correspondente, são apresentados na Tabela 7, juntamente com os valores das dxi.Vxi e o valor de $\Sigma dxi.Vxi$ ocupada pela fração de partículas com V_S inferiores a cada V_{CS} avaliada. Então, com base nos valores de 1-Fr e $\Sigma dxi.Vxi$, para cada V_{CS} avaliada no ensaio, foi determinada através da Equação 53, a Ft e a sua P (%) correspondente.

Tabela 7 – Fração total (Ft) removida e percentagem (P(%)) de remoção, referente a cada velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) avaliada no ensaio em coluna de sedimentação (ECS) realizado com efluente bruto que apresentou o valor médio de turbidez (S_o) de 241 NTU

V_{cs} (m/h)	Fr (S_i/S_o)	1-Fr	dXi	Largura de dXi	Valor Médio em dXi	VXi (m/h)	dXi.Vxi	$\Sigma dXi.Vxi$	Ft	P (%)
3,20	0,046	0,9540	0,046 - 0,04	0,006	0,043	2,35	0,0141	0,0454	0,9682	96,82
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
3,00	0,0455	0,9545	0,0455 - 0,04	0,005	0,04275	2,3	0,0115	0,0428	0,9688	96,88
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
2,80	0,045	0,9550	0,045 - 0,04	0,005	0,0425	2,2	0,0110	0,0423	0,9701	97,01
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
2,60	0,044	0,9560	0,044 - 0,04	0,004	0,042	1,75	0,0070	0,0383	0,9707	97,07
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
2,40	0,043	0,957	0,043 - 0,04	0,003	0,0415	2,1	0,0063	0,0376	0,9726	97,26
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
2,20	0,042	0,958	0,042 - 0,04	0,002	0,041	2,05	0,0041	0,0313	0,9722	97,22
			0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150			
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
2,00	0,04	0,960	0,04 - 0,03	0,01	0,035	1,5	0,0150	0,0313	0,9756	97,56
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
			0,039 - 0,03	0,009	0,0345	1,45	0,0131			
1,80	0,039	0,961	0,039 - 0,03	0,009	0,0345	1,45	0,0131	0,0293	0,9773	97,73
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
			0,036 - 0,03	0,006	0,033	0,1375	0,0008			
1,60	0,036	0,964	0,036 - 0,03	0,006	0,033	0,1375	0,0008	0,0171	0,9747	97,47
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
			0,034 - 0,03	0,004	0,032	1,3	0,0052			
1,40	0,034	0,966	0,034 - 0,03	0,004	0,032	1,3	0,0052	0,0215	0,9813	98,13
			0,03 - 0,02	0,01	0,025	0,925	0,0093			
			0,02 - 0,01	0,01	0,015	0,525	0,0053			
			0,01 - 0,0	0,01	0,005	0,175	0,0018			
			0,034 - 0,03	0,004	0,032	1,3	0,0052			

No Gráfico 36, é apresentado o comparativo de valores de P (%) para as TAS avaliadas em cada ECS. Então, a partir dos valores de P (%) foi verificado inicialmente que caso o projeto no NMD fosse contemplado com base nos valores de TAS compreendidos na faixa de 76,8 m³/m².dia a 33,6 m³/m².dia, poderia se esperar uma remoção teórica acima de 96%, para as partículas flocculentas originadas no STQ na condição mínima de reagentes químicos, com valores de V_s variando de 3,2 m/h a 1,4 m/h.

Gráfico 36 – Comparativo de percentagem (P(%)) de remoção de partículas em função da taxa de aplicação superficial (TAS) para cada ensaio em coluna de sedimentação (ECS)



Leme (1990) define que para o dimensionamento dos decantadores, a providência inicial consiste na fixação das condições críticas do projeto, que constituem nas condições predominantes do dimensionamento. Então, em virtude da ETE em operação não possuir um sistema de filtração rápida (SFR) após a etapa de SDL, para reduzir ainda mais os valores de S_i presentes no efluente tratado, o NMD foi projetado para atender uma TAS de 33,6 m³/m².dia, ou seja, para remover partículas com V_{CS} de 1,4 m/h, objetivando assim, uma P (%) superior a 98%, para correntes de efluente bruto com diferentes valores de S₀.

4.4 Etapa 4 – Determinação da velocidade de escoamento longitudinal máxima ($V_{O \text{ máx}}$) no interior do antigo módulo de decantação (AMD), necessária para evitar o arraste de flocos na condição mínima de dosagem de reagentes químicos

Conforme apresentado na Tabela 8, com base no valor de V_O de 9,23 m/h e no valor de Re de 244,2 que foi obtido através da Equação 39, foi determinada através da Equação 44, a $V_{O \text{ máx}}$ a ser respeitada no interior de cada duto do AMD, para que não ocorra o arraste teórico das partículas em processo de sedimentação, quando considerado para o projeto a V_{CS} de 1,4 m/h.

Tabela 8 – Resultado de velocidade máxima de escoamento longitudinal ($V_{O \text{ máx}}$) para a velocidade crítica de sedimentação (V_{CS}) de 1,4 m/h em função do número de Reynolds (Re) de 244,20 e velocidade longitudinal de escoamento (V_O) de 9,23 m/h

V_{cs} (m/h)	Re	V_o (m/h)	$V_o \text{ máx}$ (m/h)
1,40	244,20	9,23	7,73

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, é verificado que o AMD não apresentava as condições geométricas e de fluxo no interior de cada duto, necessárias para evitar o arraste teórico de flocos com V_{CS} de 1,4 m/h sob uma Q de 20 m³/h.

Como foi considerada uma TAS de 33,6 m³/m².dia, foi necessária a redefinição das condições geométricas dos dutos a serem contemplados no projeto do NMD, para não ocasionar assim, a ressuspensão e arraste teórico de flocos depositados durante o processo de sedimentação no SDL, quando em atendimento à condição crítica de processo estabelecida.

4.5 Etapa 5 – Determinação da condição geométrica no interior de cada duto, a ser considerada no projeto do novo módulo de decantação (NMD) para evitar o arraste de flocos na condição mínima de dosagem de reagentes químicos

Para não ocorrer o arraste teórico das partículas com V_{CS} de 1,4 m/h com o NMD operado sob uma Q de 20 m³/h, foi identificado através da Equação 44 que a $V_{O \text{ máx}}$ deveria ser maior ou igual a V_O de 9,23 m/h. Então, considerando a V_{CS} de 1,4 m/h e adotando o valor de $V_{O \text{ máx}}$ de 9,23 m/h para o projeto, foi identificado através de Equação 44 que a condição geométrica no interior de cada duto de sedimentação do NMD deveria apresentar um regime de escoamento identificado por valor de Re mínimo de 347,7.

Vargas et al. (2004) informam que em projetos realizados com decantadores laminares, foram obtidos excelentes resultados com dispositivos operando com Re inferiores a 500. Porém, de acordo com Richter (2009), apesar de existir ainda a recomendação de se utilizar valores de Re de 500 a 250, é errôneo utilizar este parâmetro como o critério único para o projeto destes tipos decantadores, pois o mesmo é uma consequência direta das condições geométricas do duto de sedimentação e da velocidade de fluxo em seu interior.

Considerando o valor da ν da água a 20°C de 0,000001 m²/s e adotando o valor de $V_{O \text{ máx}}$ de 9,23 m/h como sendo o valor de V_O , para a ocorrência de um valor de Re de 347,7 no interior de cada duto do NMD, foi determinado através da Equação 39 um valor de R_H de 33,90 mm.

4.6 Etapa 6 – Determinação das medidas necessárias para dimensionamento do novo módulo de decantação (NMD)

Para definição da largura da base (b) de cada duto utilizado no projeto, foi considerada inicialmente a (l_{is}) de 1790 mm. Porém, conforme verificado na Figura 13, para a instalação do NMD no interior do SD, foi necessário realizar a fixação de uma viga de assento, que em função da aplicação de cordão de solda, apresentou após a instalação um diâmetro externo (d_{VA}) de 80 mm.

Figura 13 – Fixação da viga de assento para o novo módulo de decantação (NMD) no interior do silo de decantação (SD)



Em função do valor de d_{VA} ser 80 mm, foi necessário desconsiderar 160 mm da largura interna (b_{NMD}) do duto no interior do NMD. Assim, no dimensionamento de cada duto foi considerado um valor de b de 1630 mm. Então, para que cada duto apresentasse um valor de R_H de 33,90 mm, foi determinado através da Equação 45 um valor de d de 70,75 mm.

Referente ao valor de Θ para as placas planas a serem instaladas no interior do NMD, a NBR 12216/1992 não especifica um valor ideal a ser adotado no dimensionamento, porém, são encontradas na literatura várias recomendações e sugestões, ficando a critério do projetista, uma análise prévia dos valores a serem empregados.

Lee e Lin (1999) sugerem que os valores de Θ sejam fixados em valores de 7° a 60° , sendo que Bourke (2002) e Montgomery (1985) sugerem que o valor de Θ para os dutos seja fixado em 60° . Entretanto, estes autores não informam sob quais condições de operação da unidade de tratamento ou em quais características de efluente, estes valores de Θ poderiam estar sendo avaliados e adotados para aplicação no projeto.

A Central Public Health and Environmental Engineering Organisation (1999) correlaciona a condição de sedimentabilidade do lodo produzido no sistema de decantação com valores de Θ para os dutos empregados, informando que quando se visam ao mesmo tempo, facilidade na remoção do material sedimentado e eficiência de remoção do lodo depositado, que o valor de Θ seja mantido em valores fixados entre 40° a 60° . Da mesma forma, quando se visa o escoamento contínuo do lodo durante o funcionamento do decantador, sem ocasionar a perda de eficiência deste dispositivo, Richter (2009) informa que sejam mantidos valores de Θ variando de 50° a 60° .

Além da influência do valor de Θ na remoção contínua de lodo durante o escoamento de efluente coagulado e floculado no interior do duto, é verificado com Yao (1970) que quando mantidos os mesmos valores de V_{CS} e V_O , quanto menor o valor de Θ , menor será o valor de L , ao contrário disto, quanto maior o valor de Θ , maior será o valor de L . Assim, como o dimensionamento do duto é obtido também em função do valor de L , as demais dimensões geométricas necessárias para o projeto do NMD seriam diretamente influenciadas em função do valor de Θ . Então para o projeto do NMD, objetivando o escoamento contínuo do lodo depositado no interior dos dutos durante a clarificação do efluente, foram verificados quais os valores de Θ compreendidos de 40° a 60° , resultariam em valores de H_P e C_m , passíveis de instalação no interior do SD existente na ETE.

Considerando o fator S de 1, que é referente ao duto do tipo placa plana, são apresentados na Tabela 9, os valores de L necessários para sedimentação de partículas com V_{CS} de 1,4 m/h, sob a V_O de 9,23 m/h no interior dos dutos formados entre placas planas com valores de Θ variando de 40° a 60°, determinados através da Equação 36.

Em função de uma mudança de regime de escoamento na entrada de cada duto, Yao (1970) recomenda que seja adicionado o valor de L_s ao valor de L.

A NBR 12216/1992 não faz nenhuma referência a necessidade deste valor de L_s no dimensionamento do duto, mas Alcócer et al. (2000), após verificar a ocorrência de remoção de partículas discretas no trecho de transição, recomenda que o mesmo seja adicionado ao valor L do duto. Desta maneira, considerando o valor de Re mínimo de 347,7 e um coeficiente C com valor de 0,01, que de acordo com que foi verificado com Richter (2009), é o valor considerado para dutos com geometria do tipo formado entre placas planas, foi determinado através da Equação 38 o valor de L_s de 3,48.

Em função dos valores Θ de 40° a 60° e seus respectivos valores de L determinados através da Equação 36, são apresentados na Tabela 9, os resultados de L_t determinados através da Equação 37 e os seus respectivos valores de l_U determinados através da Equação 46, considerando para cada duto, o valor de d de 70,75 mm e L_s de 3,48 .

Tabela 9 – Resultados de comprimento relativo (L), comprimento relativo total (L_t) e comprimento útil (l_U) em função do valor de ângulo de inclinação (Θ)

ITEM	Θ de 40°	Θ de 45°	Θ de 50°	Θ de 55°	Θ de 60°
L	7,76	8,32	9,06	10,07	11,45
L_s	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48
L_t	11,24	11,80	12,54	13,55	14,93
l_U (mm)	795,2	834,9	887,2	958,6	1056,3

Cada valor de l_U apresentado na Tabela 9, é referente somente ao trecho do duto formado entre as placas planas, onde estaria ocorrendo a mudança de regime e a deposição das partículas com V_S de 1,4 m/h. Então, para a definição do l de cada placa plana, foi necessário adicionar ainda a cada valor de l_U , o trecho de comprimento necessário para nivelamento da altura das placas no interior do NMD.

Referente ao trecho de comprimento, que também varia em função do valor de Θ adotado, resulta em plano horizontal no d_P para as placas planas instaladas no NMD. Assim, considerando a d de 70,75 mm e ainda, adotando o valor de E_P de 10 mm para cada placa plana utilizada no projeto, são apresentados na Tabela 10, os resultados de d_P determinados através da Equação 47 e os respectivos resultados de l determinados através da Equação 48, referentes a cada valor de l_U determinado em função do valor de Θ avaliado.

Tabela 10 – Resultados de afastamento entre placas (d_P), comprimento total (l) de duto em função do valor de comprimento útil (l_U) de duto e ângulo de inclinação (Θ)

ITEM	Θ de 40°	Θ de 45°	Θ de 50°	Θ de 55°	Θ de 60°
l_U (mm)	795,2	834,9	887,2	958,6	1056,3
d_P (mm)	125,62	114,20	105,41	98,58	93,24
l (mm)	891,4	915,6	955,0	1015,1	1102,9

Através dos resultados apresentados na Tabela 10, foi necessário verificar qual dos valores de l determinados em função do valor de Θ , resultaria em valores de H_P e C_m , passíveis de instalação no interior SD existente, cujos valores de comprimento interno (C_{is}) e altura para instalação de placas (H_{is}) foram identificados respectivamente, como sendo 2400 mm e 1200 mm.

Na Tabela 11, em função de cada valor de Θ avaliado, são apresentados os resultados de H_P determinados através da Equação 49, a partir dos resultados de l apresentados na Tabela 10.

Tabela 11 – Resultados de altura de placa (H_P), determinados em função do valor de comprimento total (l) de duto e ângulo de inclinação (Θ)

ITEM	Θ de 40°	Θ de 45°	Θ de 50°	Θ de 55°	Θ de 60°
l (mm)	891,4	915,6	955,0	1015,1	1102,9
H_P (mm)	572,9	647,4	731,6	831,5	955,1

Com base nos resultados da Tabela 11, foi verificado que todos os resultados de H_P determinados em função dos valores de l e de Θ , resultaram em valores inferiores ao valor de H_{is} de 1200 mm. Porém, foi necessário verificar qual das configurações de valor de Θ , resultariam em valores de C_m inferiores ao valor de C_{is} de 2400 mm.

Inicialmente, foi determinado para cada valor de Θ avaliado, o valor de A a ser disponibilizada horizontalmente em valores de A_o para os dutos, bem como, os valores de N necessários para divisão de cada valor de A no NMD.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados de A que foram determinados através de Equação 50 em função dos valores de L obtidos em função dos valores de Θ e considerando ainda, V_{CS} de 1,4 m/h, Q de 20 m³/h e o fator S de 1 para o tipo de duto. Com base nestes valores de A , também são apresentados na Tabela 12, os resultados de N que foram determinados através da Equação 51, considerando o valor de d de 70,75 mm e α de 1630 mm para cada duto que foi projetado no NMD.

Tabela 12 – Resultados de área superficial útil (A) e o número de dutos (N) em função do valor de comprimento relativo (L) de duto e ângulo de inclinação (Θ)

ITEM	Θ de 40°	Θ de 45°	Θ de 50°	Θ de 55°	Θ de 60°
L	7,76	8,32	9,06	10,07	11,45
A (m ²)	3,37	3,06	2,83	2,65	2,50
N (canais)	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8

Conforme verificado anteriormente nos resultados da Tabela 10, quanto menor o valor de Θ das placas planas, maior será o valor de d_p , conseqüentemente, maior será o valor de A projetada horizontalmente pelo valor de A_0 . Porém, como o valor de A_0 é dado com base no valor de d de 70,75 mm e valor de α de 1630 mm, para atendimento a um valor de V_{CS} de 1,4 m/h e um valor de V_0 de 9,23 m/h, foi identificado que o valor de N sempre será o mesmo valor, independente dos valores de Θ definido para os dutos. Fica aqui a ressalva, que ao invés do valor de N de aproximadamente 18,8 dutos, foi considerado para o projeto do NMD o valor de N de 19 dutos.

Então, conforme os resultados apresentados na Tabela 13 foram determinados através da Equação 52, os valores de C_m em função de cada valor de Θ e l, considerando para isto, o valor de N de 19 dutos com um valor de d de 70,75 mm, formados entre as placas planas com valor de E_p de 10 mm.

Tabela 13 – Resultados de comprimento de módulo (C_m) em função do valor de comprimento total (l) de duto e ângulo de inclinação (Θ)

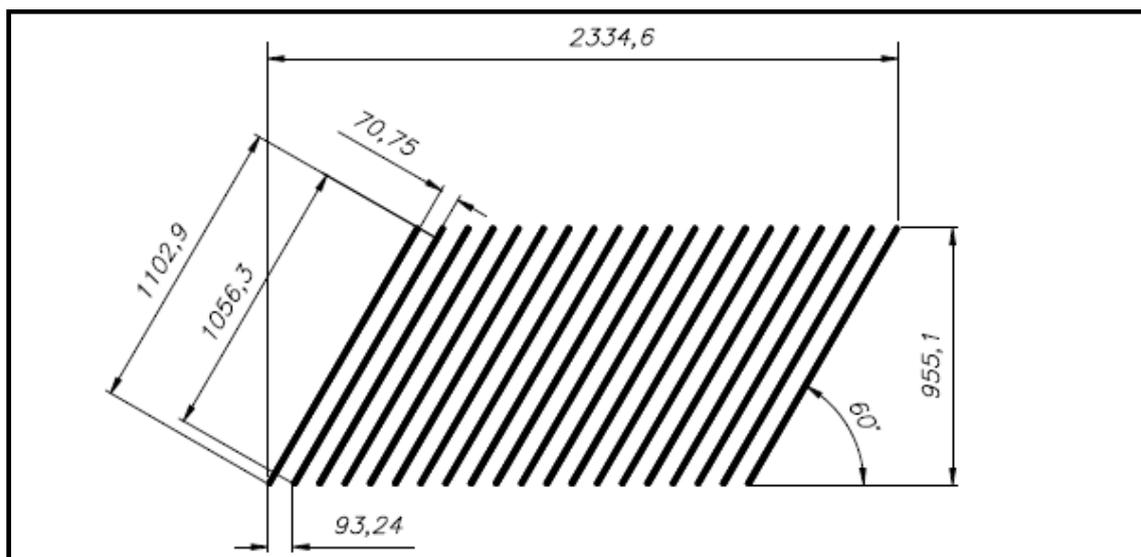
ITEM	Θ de 40°	Θ de 45°	Θ de 50°	Θ de 55°	Θ de 60°
l (mm)	891,4	915,6	955,0	1015,1	1102,9
C_m (mm)	3085,3	2831,3	2629,7	2467,4	2334,6

De acordo com os resultados de H_p apresentados na Tabela 11, foi verificado que não há restrição de instalação no interior do SD, de dutos formados entre placas planas com valores de Θ de 40° a 60° , para realizar a remoção de partículas com V_s de 1,4 m/h sob uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Porém, com base nos resultados apresentados na Tabela 13, apenas a configuração de NMD com valor de Θ de 60° e l de 1102,9 mm, apresentou C_m passível de instalação no interior do SD.

4.7 Etapa 7 – Construção e instalação do novo módulo de decantação (NMD)

Na Figura 14 é apresentado o desenho do NMD do tipo placa plana paralela, com as dimensões geométricas determinadas em função do valor de Θ de 60° . Em função da necessidade de 19 dutos, foi necessário considerar para o projeto, a instalação de 20 placas planas.

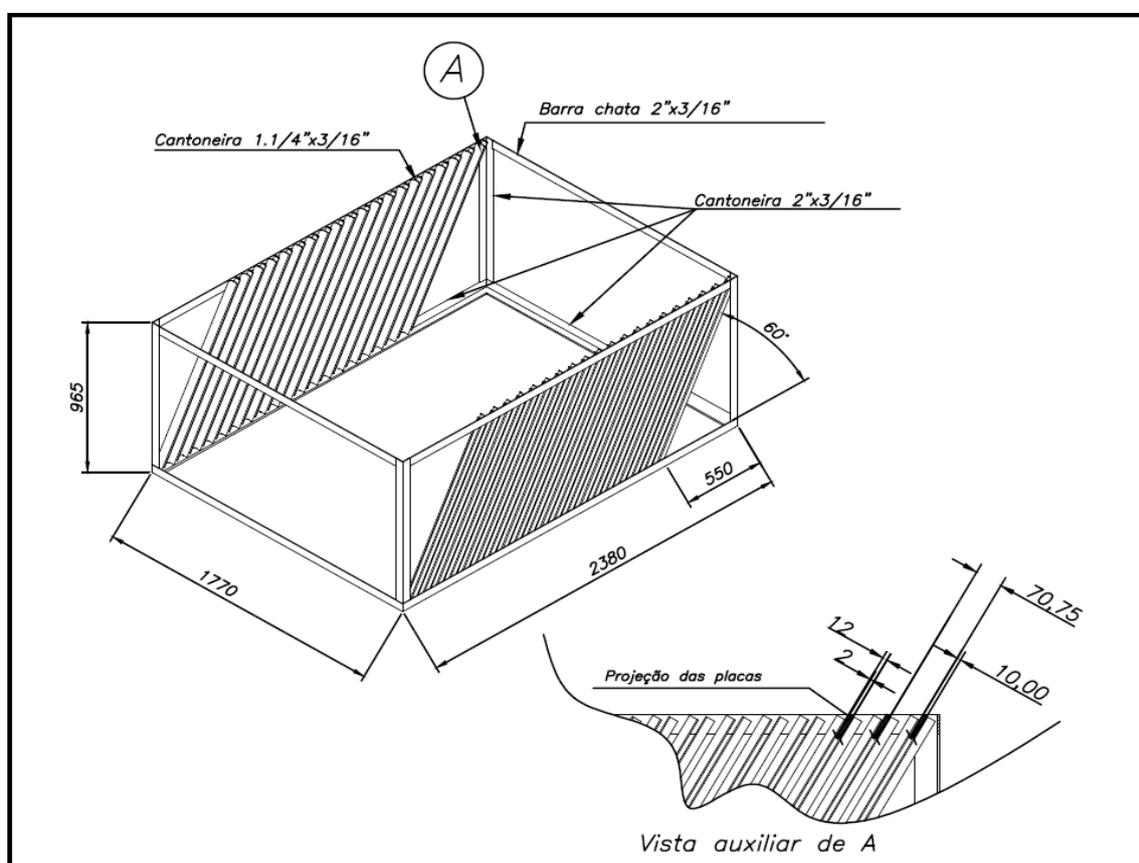
Figura 14 – Dimensões geométricas (mm) do novo módulo de decantação (NMD) do tipo placa plana paralela, determinadas em função do valor de ângulo de inclinação (Θ) de 60°



Respeitando as dimensões geométricas apresentadas na Figura 14 e as dimensões internas de L_{is} de 1790 mm e C_{is} de 2400 mm do SD existente, foi necessário confeccionar um suporte de fixação para as placas planas no interior do mesmo.

Conforme apresentado na Figura 15, visando facilidade de instalação do NMD no interior do SD, o suporte de fixação foi projetado com largura externa (l_{es}) de 1770 mm, comprimento externo (C_{es}) de 2380 mm e altura externa (H_{es}) de 965 mm, respeitando assim o valor de H_P de 955,1 mm.

Figura 15 – Dimensões geométricas (mm) do suporte de fixação para o novo módulo de decantação (NMD) do tipo placa plana paralela



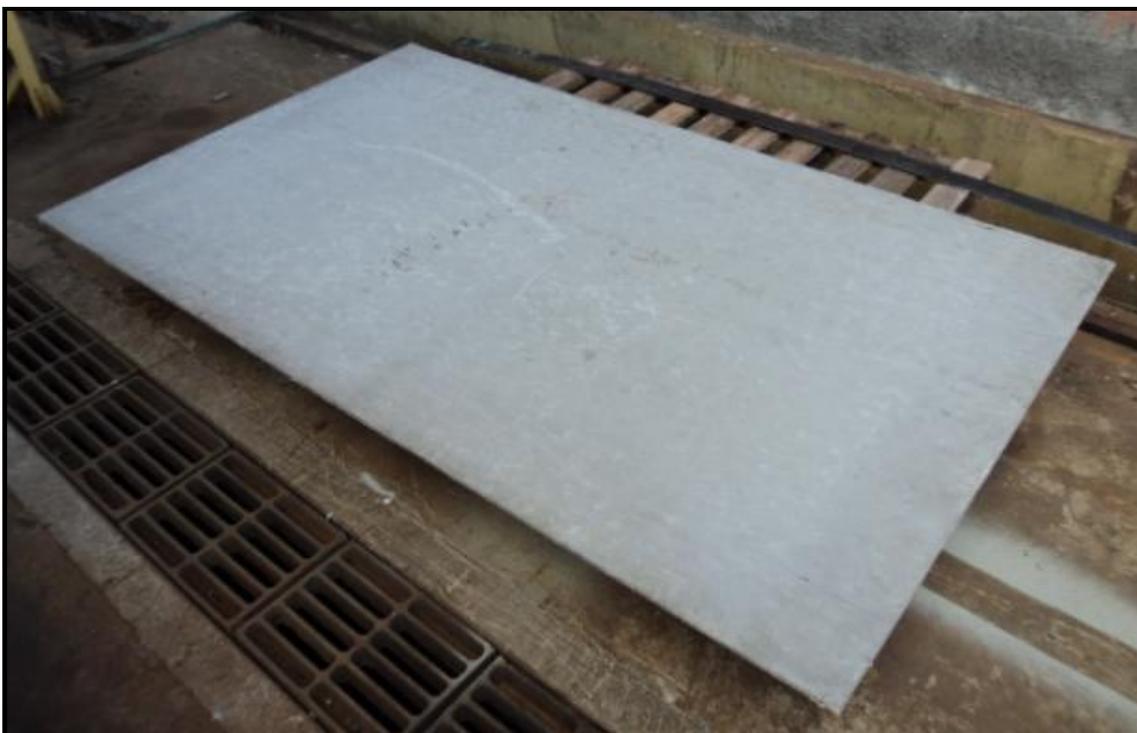
No cálculo de projeto foi definida uma E_P de 10 mm para cada plana, assim, conforme apresentado no detalhe da vista auxiliar de A do desenho da Figura 15, para facilitar a instalação de cada placa plana no suporte de fixação, foi considerada uma distância interna (d_{ic}) de 12 mm para cada canaleta vertical de encaixe das placas, formada entre duas cantoneiras de 1.1/4" x 3/16".

Para definição das dimensões geométricas de cada placa plana, foi levado em consideração que a cantoneira e a barra chata, ambas utilizadas na montagem estrutural do suporte de fixação, apresentaram a espessura (E_C) de $3/16"$, ou seja, 4,75 mm, sendo esta, a mesma E_C da cantoneira de $1.1/4" \times 3/16"$, utilizada para formação da canaleta vertical de encaixe das placas.

Para facilitar a instalação das placas no suporte de fixação, foi considerada uma folga lateral de 5 mm no interior de cada canaleta formada entre as cantoneiras de fixação. Então, considerado junto com este valor de folga lateral de 5 mm, os valores de E_C das barras chatas de $2" \times 3/16"$ e das cantoneira de $1.1/4" \times 3/16"$ e $2" \times 3/16"$, cada placa plana a ser instalada no interior do suporte de fixação deveria apresentar a largura (l_P) de 1740 mm.

Conforme apresentado na Figura 16, a placa plana utilizada experimentalmente no projeto foi a do tipo placa cimentícia com reforço estrutural de fibra, fornecida comercialmente com as dimensões de 10 mm de E_P , comprimento (C_P) de 2000 mm e (l_P) de 1200 mm.

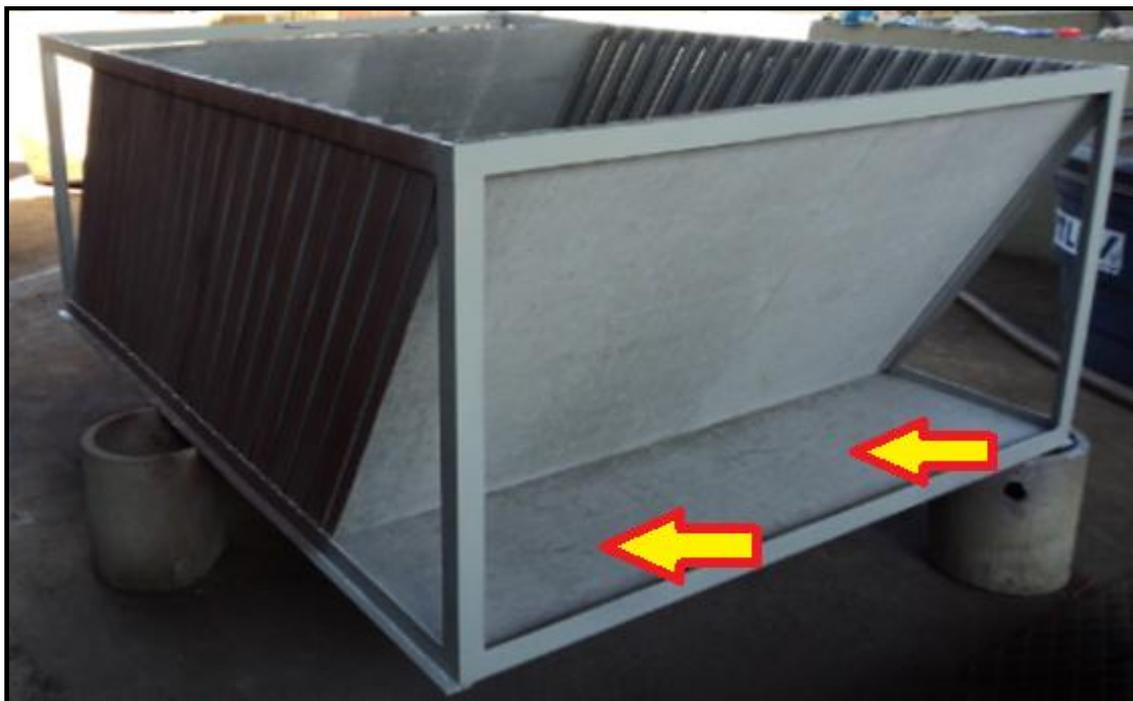
Figura 16 – Placa cimentícia fornecida comercialmente com as dimensões geométricas de 10 mm (E_P) x 2000 mm (C_P) x 1200 mm (l_P)



Porém, para realizar a instalação de cada placa plana no suporte de fixação, foi necessário realizar a redução das dimensões geométricas apresentadas na Figura 16, de modo que cada placa plana apresentasse a C_P de 1740 mm e l de 1102,9 mm.

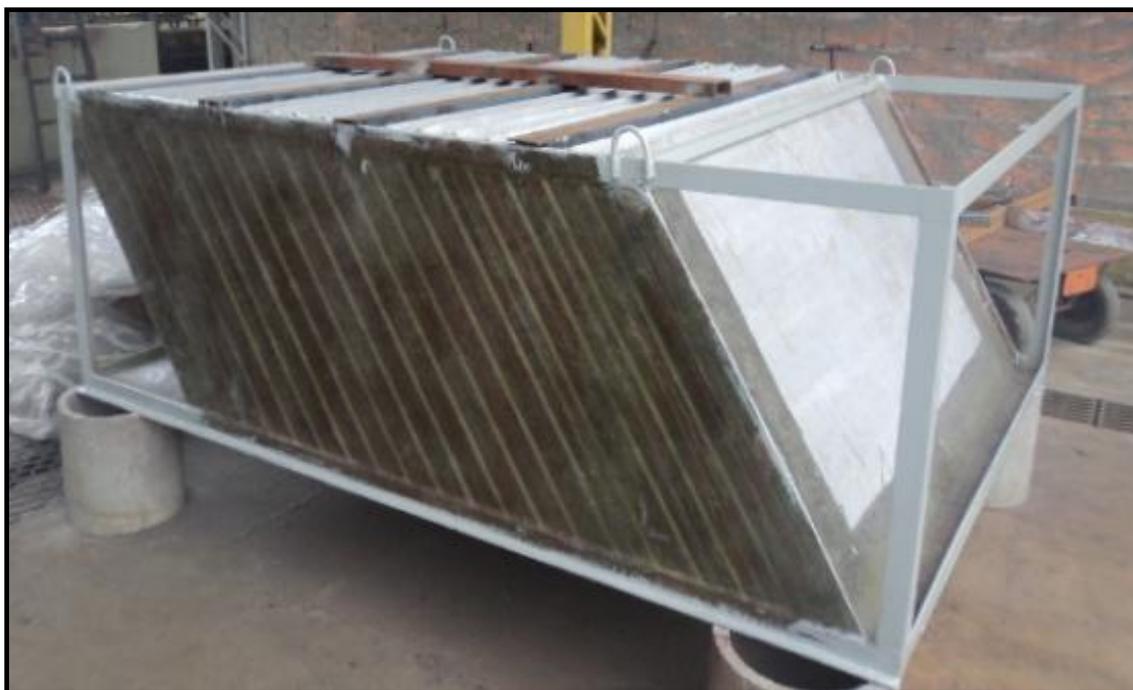
Conforme é apresentado na Figura 17, além da instalação das 20 placas planas no suporte de fixação, foi instalada também, uma placa do tipo cimentícia com as dimensões geométricas de 10 mm (E_P) x 1765,5 mm (C_P) x 545,5 mm (l_P), na área localizada no interior do NMD, onde há ausência de instalação de placas e formação de dutos de decantação, evitando assim, a ocorrência de uma possível zona de turbulência neste ponto, que como consequência, poderia estar ocasionando a ruptura de flocos e interferência na distribuição da Q de 20 m³/h entre os 19 dutos.

Figura 17 – Instalação de chapa em área com ausência de placas no interior do novo módulo de decantação (NMD)



Conforme apresentado na Figura 18, após a instalação das placas cimentícias no suporte de fixação, o dispositivo foi revestido externamente com fibra, para evitar a saída de fluxo de efluente por entre as frestas das cantoneiras utilizadas para formação das canaletas de encaixe das placas, garantindo assim, a ocorrência de sedimentação das partículas flocculentas somente no interior dos dutos formados entre as placas planas durante a operação do NMD sob uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Figura 18 – Aplicação de revestimento de fibra no suporte de fixação



Conforme apresentado na Figura 19, antes da instalação do NMD no interior do SD, foi aplicada uma camada de borracha com 5 mm de espessura (E_B) sob a viga de assento.

Esta camada de borracha valor de E_B de 5 mm, foi aplicada para realizar a vedação da junção formada entre a viga de assento e o suporte de fixação do NMD, evitando assim, correntes fugitivas e garantindo a distribuição do fluxo de efluente somente entre os 19 dutos formados.

Figura 19 – Aplicação de borracha de vedação na viga de assento



4.8 Etapa 8 – Avaliação da eficiência (E (%)) de remoção de turbidez do novo módulo de decantação (NMD)

Sob uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ e com referência às dimensões geométricas de l_u , d_{NMD} e b_{NMD} , o NMD apresentou o TDH_{NMD} de aproximadamente 7 minutos, sendo este valor, referente somente a região do SD que é ocupada pelas placas planas. Assim, a corrente de efluente bruto coagulado e floculado, independente do tempo de operação do NMD quando praticada uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ na ETE, ficará retido apenas por 7 minutos no interior dos dutos de sedimentação.

Considerando uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, além do valor de TDH_{NMD} de 7 minutos, existe outro TDH de aproximadamente 2 minutos, que é referente as dimensões geométricas da região ocupada pelo volume efluente clarificado, localizada entre os vertedores de saída de efluente clarificado do SD e a parte superior do NMD. Somando estes valores, há um TDH_T de aproximadamente 9 minutos para que o efluente entre nos dutos do NMD e seja descartado por entre os vertedores do SD.

O valor de TDH_{NMD} proporcionado pelas dimensões geométricas do NMD é inferior aos valores de TDH encontrados em decantadores laminares, que conforme Tangerino et al. (1998), apresentam o valor médio de 15 minutos. Porém, de acordo com que foi verificado com Richter e Azevedo Netto (1991), o valor de TDH não é um critério de projeto e sim, consequência de

outros aplicados no dimensionamento, como os valores de TAS e $V_{O \text{ máx}}$, que foram respectivamente especificados nos valores de $33,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e $9,23 \text{ m/h}$. Deste modo, o valor de TDH_T de 9 minutos foi utilizado para referenciar o início do tempo de coleta de amostras na saída do SD, que ficou definido com sendo 10 minutos após o início de operação de clarificação do efluente bruto no SDL.

Para avaliar a eficiência do NMD na clarificação do efluente bruto gerado pelo sistema de lavagem de gases, foram realizados 6 ensaios de operação. Desta maneira, em atendimento a uma Q de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, o STQ da ETE foi programado para atender os valores de G e TDH apresentados no Quadro 1, com as respectivas bombas dosadoras de coagulante e floculante sendo acionadas a 20 Hz.

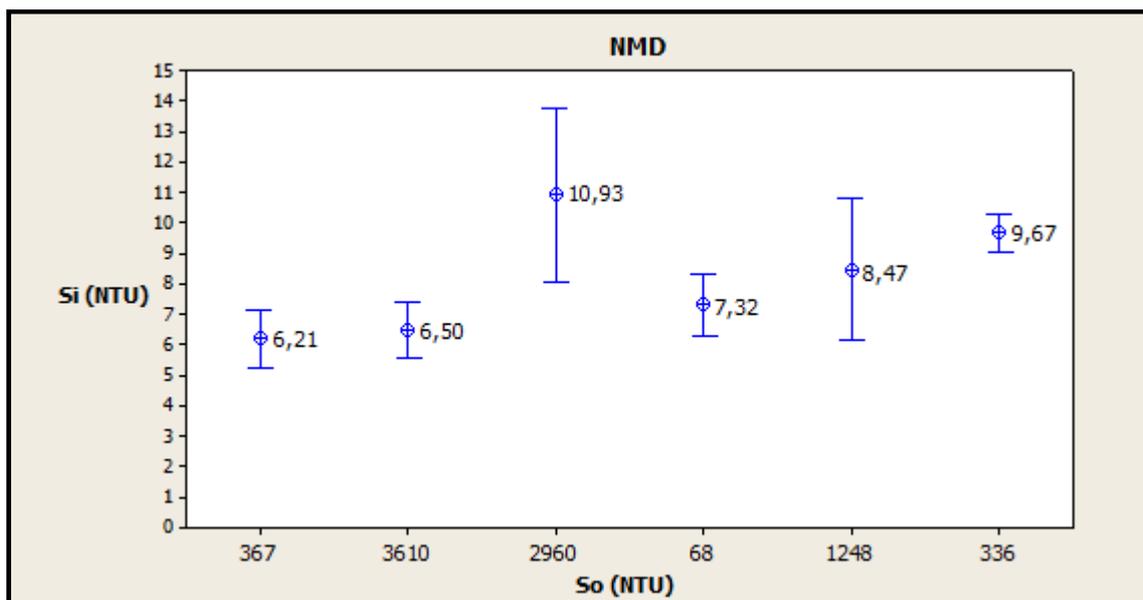
Na Tabela 14, são apresentados os valores de Si que foram obtidos durante o ensaio de clarificação com o NMD instalado no interior do SD do SDL. Semelhante com que foi verificado na Etapa 1 de diagnóstico de operação do STQ e do SDL, em cada ensaio de operação, foram recebidos para clarificação no NMD, correntes de efluente bruto com diferentes e elevados valores médios de So.

Tabela 14 – Resultados de turbidez remanescente (Si) obtidos em cada ensaio de operação com o novo módulo de decantação (NMD)

Ensaio de Operação do NMD	Amostra de Efluente Bruto	Amostra 1 de Efluente Clarificado	Amostra 2 de Efluente Clarificado	Amostra 3 de Efluente Clarificado	Amostra 4 de Efluente Clarificado
	So (NTU)	Si (NTU)	Si (NTU)	Si (NTU)	Si (NTU)
Ensaio 1	367	7,04	6,15	6,03	5,63
Ensaio 2	3610	7,17	6,67	6,37	5,8
Ensaio 3	2960	10,40	13,40	10,80	9,14
Ensaio 4	68	8,20	7,30	7,10	6,7
Ensaio 5	1248	8,5	8,18	6,83	10,4
Ensaio 6	336	9,75	9,38	9,35	10,2

Com base nos valores de S_i apresentados na Tabela 14, foram determinados os valores médios de S_i no intervalo de 95 % de confiança para cada ensaio com o NMD. Desta maneira, com referência a cada um destes ensaios, são apresentados no Gráfico 37 os valores médios de S_i .

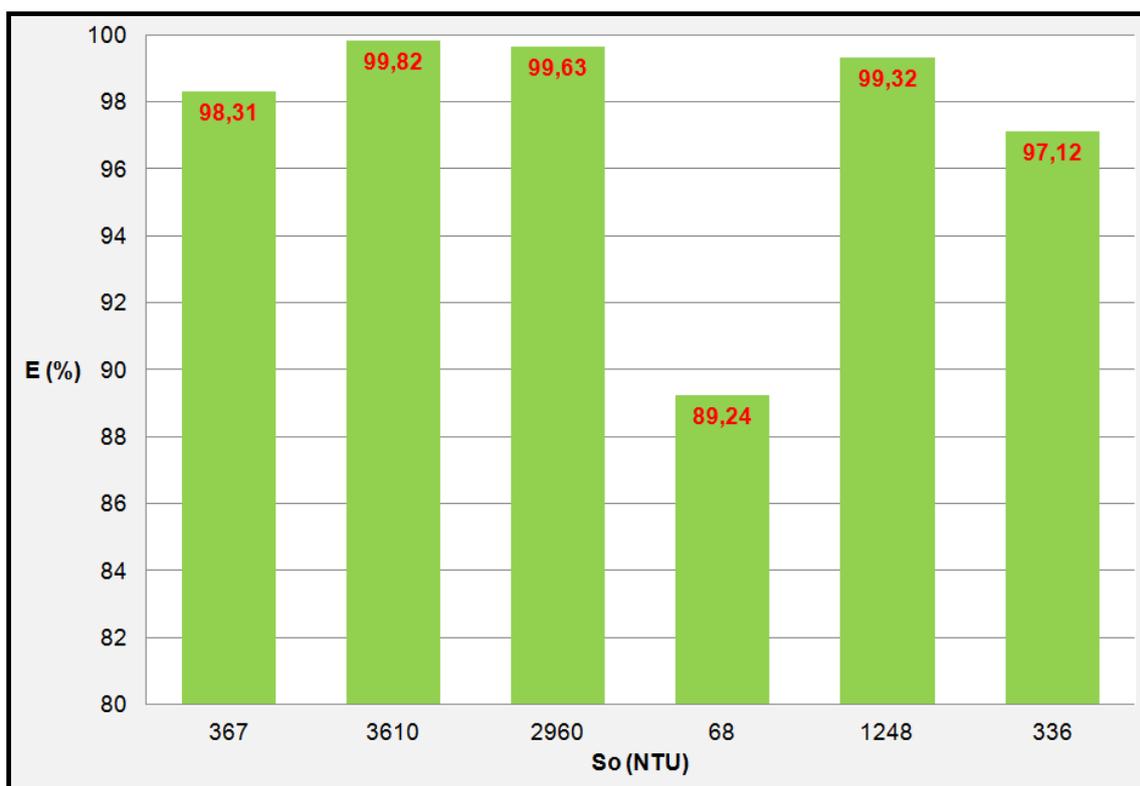
Gráfico 37 – Valores médios de turbidez remanescente (S_i) obtidos em cada ensaio com o novo módulo de decantação (NMD)



Conforme estudo estatístico apresentado no Anexo G, foi observado que os valores de S_i obtidos durante a operação do NMD e demonstrados inicialmente na Tabela 14, apresentam uma distribuição normal (p -value $\geq 0,05$). Estudo este, adotado como pré-requisito para validar o estudo de ANOVA apresentado no Anexo H, comprovando com 95 % de certeza que os valores médios de S_i apresentam uma variação estatística significativa (p -value $\leq 0,05$). Então, mesmo sendo garantidas e respeitadas as Hz e G para as etapas de coagulação e floculação sob uma Q de 20 m³/h no STQ, é verdadeiro afirmar que os valores médios de S_i que foram apresentados no Gráfico 37, são diferentes entre si e variaram independente do valor de S_o presente na composição do efluente bruto recebido para clarificação no SDL.

Através da Equação 54 e com base nos valores médios de S_i apresentados no Gráfico 37, foram determinados os valores de E (%) para cada ensaio realizado com o NMD. Estes resultados de E (%) com referência ao respectivo valor médio de S_o presente na composição de cada corrente de efluente bruto que clarificado no SDL com o NMD, são apresentados no Gráfico 38.

Gráfico 38 – Valores de eficiência de remoção (E (%)) obtidos em cada ensaio com o novo módulo de decantação (NMD)



A partir dos valores de E (%) apresentados no Gráfico 38, é verificado que o NMD apresentou valores superiores a 89 % de eficiência na remoção de turbidez presente no efluente bruto. Porém, o ensaio realizado com efluente bruto com valor médio de 68 NTU apresentou o valor de E (%) de 89,24%, sendo este valor de E (%), inferior aos valores e E (%) obtidos para os ensaios com efluente bruto com S_o de 2960 NTU, 1248 NTU e 336 NTU. Esta diferença de interpretação é em função da Equação 54 obter o valor de E (%) através da relação direta entre o valor de S_o e o valor de S_i .

Cabe ressaltar que não foram encontrados em bibliografia, dados experimentais ou práticos, que apresentem resultados finais de E (%) ou S_i , obtidos em decantadores lamelares ou em decantadores convencionais, utilizados especificamente para clarificação de efluente bruto gerado em sistema de lavagem de gases industriais proveniente de processo de fusão em indústria metalúrgica.

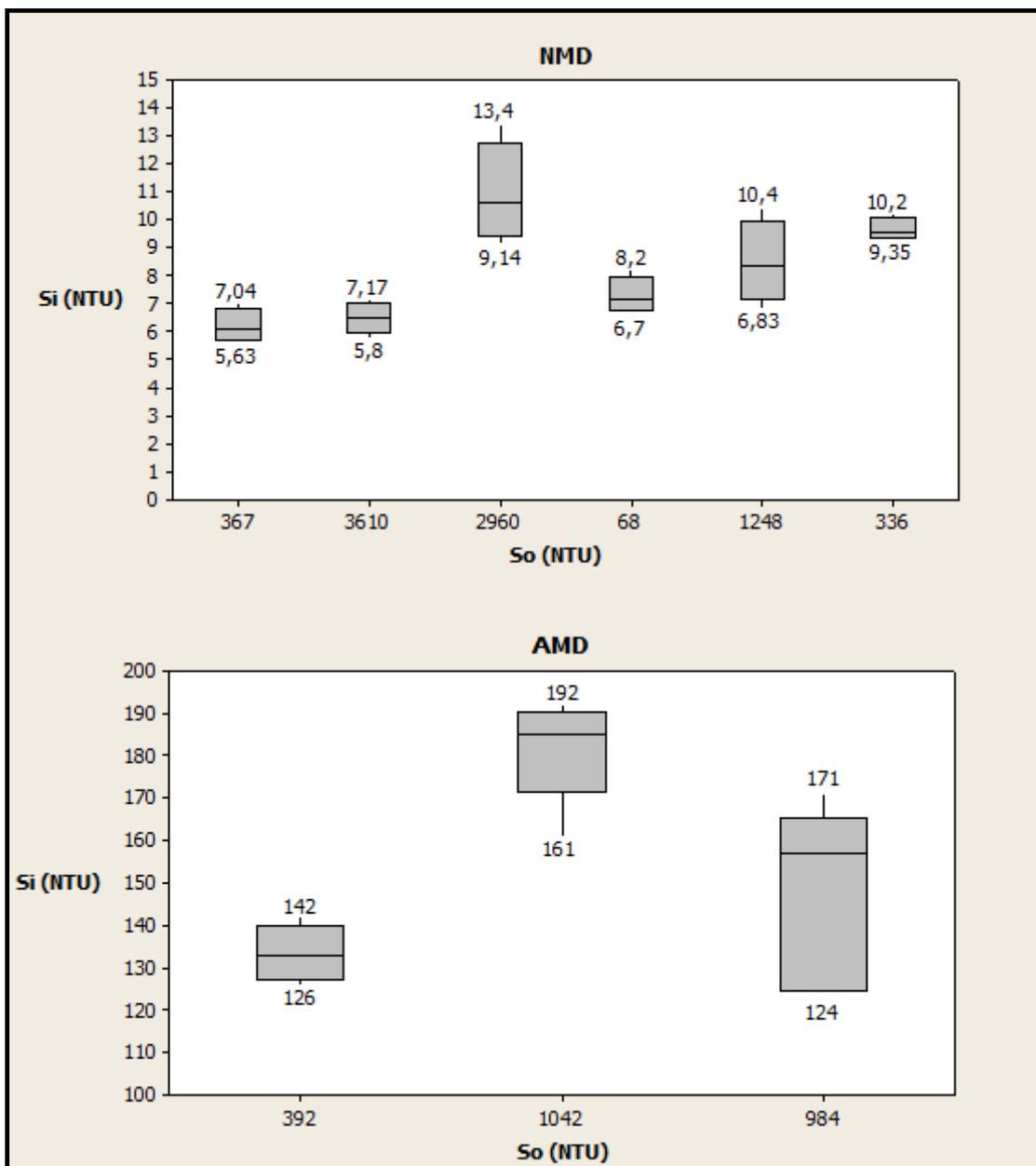
Referente ao reuso de águas residuárias em processos industriais, é importante ressaltar que não foram encontrados em normas técnicas e em bibliografia, valores sugeridos para o parâmetro turbidez, quando aplicados especificamente em lavadores de gases, impossibilitando assim, a alternativa de comparação destes possíveis valores sugeridos com os valores de S_i obtidos com o NMD instalado no SDL da ETE.

A própria EPA (2004) informa e sugere alguns valores de concentração de turbidez, praticados em alguns estados americanos e inclusive em alguns países. Porém, estes valores são apenas para aplicação em sistema de água de resfriamento, caldeiras, e em outras aplicações.

Da mesma forma que EPA (2004), Monte e Albuquerque (2010) referenciam e sugerem valores de turbidez, apenas para aplicação de água de reuso em circuitos de resfriamento de fluídos e equipamentos industriais.

Conforme demonstrado no Gráfico 39, quando comparada as faixas de valores limites de S_i obtidos sob a Q de 20 m³/h no SDL e praticando 20 Hz de dosagem de coagulante e floculante no STQ, é verificado que o NMD apresentou valores limites de S_i inferiores aos valores limites de S_i que haviam sendo obtidos com o uso do AMD, evidenciando assim, a eficiência de clarificação do NMD, independente dos valores médios de S_o presentes na composição das correntes de efluente bruto recebidos na ETE.

Gráfico 39 – Comparativo dos valores limites de turbidez remanescente (Si) entre o antigo módulo de decantação (AMD) e o novo módulo de decantação (NMD)



5. CONCLUSÃO

A Estação de Tratamento de Efluentes avaliada possui um sistema de tratamento químico, que permite valores de gradiente de velocidade e tempo de detenção hidráulica, suficientes para realizar as etapas de coagulação e floculação em seus tanques de tratamento, entretanto, além do antigo módulo de decantação apresentar visualmente elevado arraste de flocos no vertedor de saída do silo de decantação, foi verificado que as dimensões de projeto deste dispositivo não poderiam ser utilizadas para o projeto do novo módulo de decantação, em função das mesmas indicarem arraste teórico de flocos, quando em atendimento a taxa superficial desejada de $33,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ praticada sob uma vazão de $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

O dimensionamento de um novo módulo de decantação lamelar com ângulo de inclinação das placas de 60° permitiu a sua instalação no interior do silo de decantação existente na ETE, evitando assim, gastos com redimensionamento do sistema de decantação lamelar. Os cuidados que se teve antes da instalação do novo módulo de decantação, tais como aplicação de revestimento de fibra, aplicação de uma camada de borracha de vedação na viga de assento do módulo e instalação de uma chapa na região do módulo isenta de placas, se apresentaram eficientes para evitar saídas de efluente por possíveis frestas e surgimento de zonas de turbulência na base inferior do módulo, contribuindo assim, para direcionamento da vazão de $20 \text{ m}^3/\text{h}$ de efluente coagulado e floculado somente entre os dutos de sedimentação.

Em atendimento aos critérios estabelecidos no projeto, com o estabelecimento da velocidade longitudinal máxima de escoamento de 9,23 m/h, necessária para evitar a ressuspensão e arraste teórico de flocos com velocidade crítica de sedimentação de 1,4 m/h sob uma vazão de 20 m³/h, o novo módulo de decantação apresentou eficiência de remoção de turbidez acima de 89 % com valores de turbidez remanescente variando de 5,63 NTU a 13,4 NTU, diferente assim, dos valores obtidos com o antigo módulo de decantação, que apresentou eficiência máxima de 85 % e valores de turbidez remanescente variando de 124 NTU a 192 NTU, validando desta maneira, a metodologia de cálculo empregada para o projeto.

REFERÊNCIAS

ALCÓCER C., N. E.; DI BERNARDO, L.; SCHULZ, H. E.; ROMA, W. N. L. **Investigação experimental sobre a sedimentação de partículas em dutos quadrados e retangulares usados na decantação de alta taxa.** XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Anais Eletrônicos, 2000, Porto Alegre, RS, Brasil.

ALCÓCER C., N. E.; DI BERNARDO, L. **Influência da geometria do duto e das características do escoamento na decantação de alta taxa.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental, 2001, João Pessoa, PB, Brasil.

ASGHARZADEH, H.; FIROOZABADI, B.; AFSHIN, H. **Experimental investigation of effects of baffle configurations on the performance of a secondary sedimentation tank.** Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering, 2011, p: 938-949.

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

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; ARAUJO, Roberto; FERNANDEZ, Miguel Fernandez y; ITO, Acácio Eiji. **Manual de Hidráulica.** 8.ed.. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1998.

BISTAFA, Sylvio R. **Mecânica dos fluídos: noções e aplicações.** São Paulo: Editora Blucher, 2010.

BOURKE, Noel; CARTY, Gerry; O`LEARY, Gerard; CROWE, Matt; PAGE, Darrage. **Water Treatment Manuals. Coagulation, Flocculation & Clarification.** Environmental Protection Agency – EPA. Ireland, 2002.

CARISSIMI, Elvis. **Desenvolvimento do reator gerador de flocos (RGF): Aspectos teóricos e aplicações no tratamento e reuso de águas e efluentes.** Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2007, Porto Alegre, Brasil.

CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais.** 2. ed.. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2009.

Central Public Health and Environmental Engineering Organisation. **Manual on water supply and treatment.** 3ªed., New Delhi: Ministry of Urban Development, 1999.

CUNHA, Marcia V. P. de Oliveira. **Importância da Frequência de Descarte de Lodo na Eficiência dos Decantadores de Estações de Tratamento de Água em Ciclo Completo.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, 2004, Belém, Brasil.

DEMIR, Ahmet. **Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks.** Water Research, Vol.29, n.2, p: 611 – 616, Feb. 1995, Great Britain.

Di BERNARDO, Luiz. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** Vol. I. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

Di BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 2. ed.. São Carlos: Rima, 2005.

DI BERNARDO, L.; SCHULZ, H. E. **Desenvolvimento de zona de transição em dutos usados na decantação de alta taxa**. ANAIS DO 16º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Vol.2, p: 41 – 47, GOIÂNIA, 1991.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. Washington DC: U.S. Agency for International Development, 2004.

FILHO, Allyrio Macedo; BRANCO, Zadir Castello. **Água, Tratamento e Qualidade**. American Water Works Association (AWWA). Rio de Janeiro: Editora Ao Livro Técnico S.A., 1964.

GOMES, Fernanda C. **Decantação Acelerada: Alternativa para o tratamento de vazão excedente de esgoto – estudo na ETE Martin de Sá (Caraguatatuba/SP)**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, USP, 2010, São Paulo, Brasil.

KOWALSKI, Wlodzimiers P. **The Method of Calculations of the Sedimentation Efficiency in Tanks with Lamella Packets**. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. Vol. 51, Nº 4, 2004, p: 371–385.

KOWALSKI, Wlodzimiers P.; MIESO, R. **Cross-current lamella sedimentation tanks**. Archives of civil and mechanical engineering. Vol.IV, Nº 4, 2004, p: 5 - 26.

LEE, C.C.; LIN, Shun Dar. **Handbook of environmental engineering calculations**. Mc Graw Hill, New York, 1999.

LEME, Francílio Paes. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. 2.ed. Rio de Janeiro: ABES, 1990.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2.ed. Campinas: Editora Átomo, 2008.

LIMA, Rosa M.F.; LUZ, José A. M. **Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes.** Revista Escola de Minas. Vol.54 nº2. Ouro Preto, Abril/Junho 2001, p: 155-159.

LIRA, Juliana Rodrigues. **Estudo dos parâmetros que influenciam a floculação na sedimentação contínua.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química – Universidade Federal de Uberlândia, 2010, Uberlândia, Brasil.

LOPES, Vanessa C. **Proposição de um índice para avaliação do desempenho de estações convencionais de tratamento de água.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2005, Belo Horizonte, Brasil.

MACÊDO, Jorge Antônio Barros de. **Águas & Águas.** São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 2001.

MONTGOMERY, James M. **Water treatment principles and design.** John Wiley and Sons Inc., EUA, 1985.

MONTE, Helena Marecos do; ALBUQUERQUE, António. **Reutilização de Águas Residuais.** ERSAR - Instituto superior de Engenharia de Lisboa, Guia Técnico nº14, 2010.

OLIVEIRA, Danieli Soares de. **Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de floculadores tubulares helicoidais.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2008, Vitória, Espírito Santo.

PEREIRA, Ivo A. B. B. **Escoamento Turbulento em Torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds “Comparação entre Modelos de Turbulência”**. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, 2010, Porto, Portugal.

PORTO, Sergio B. C. **Estudo da eficiência de remoção das partículas floculentas a partir da simulação de suas trajetórias em decantadores**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1982, São Carlos, Brasil.

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

RICHTER, Carlos A; AZEVEDO NETTO, José M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Editora Blucher, 1991.

RICHTER, C.A.; SCHUCHARDT, W. **Projeto racional de decantadores**. ANAIS do 15º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Vol.2, p: 523 – 551, Belem, 1989.

ROBESCU, D.; MANDIS, C.; ROBESCU D. **Design lamellar secondary settling tank using numerical modeling**. U.P.B. Sci. Bull. Series D, Vol. 72, 2010, p: 212-216.

SAADY, Noori M.C. **Experimental verification of inclined plate settling models**. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation.Vol.6, N°3, Sept/2011, p: 309-315.

SAADY, Noori M.C. **Effects of inclined plates and polyelectrolyte on the performance of settling tanks**. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation.Vol.7, N°1, March/2012, p: 35-42.

SILVA, Maria Margarida Mota da. **Ensaio de coagulação floculação da água residual afluyente a ETAR de Avis**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010, Lisboa, Portugal.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 21ª Edição – 2130 B.

TANAC S/A. **MANUAL PRÁTICO PARA O USO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO**. BOLETIM TÉCNICO / TANFLOC, 2003.

TANGERINO, Edson P.; MATSUMOTO, Tsunao; DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton. **Floculador de manta de lodo associado a decantador laminar em tratamento de água**. Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; AIDIS. Gestión ambiental en el siglo XXI, p.1-10, Lima, 1998.

TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin L. **Wastewater Engineering: treatment, disposal, and reuse / Metcalf&Eddy**, Inc. 3.ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.

VARGAS, Lidia Cánepa; YACTAYO, Victor Maldonado; MARTEL, Ada Barrenechea; ZUMAETA, Margarita Aurazo de. **Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría**. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria e Ciencias Del Ambiente – CEPIS. Organización Panamericana de La Salud – OPS. Lima, 2004.

VLASBON, W.J.; MIEDEMA, S. A. **A Theory for Determining Sedimentation and Overflow Losses in Hoppers**. Proc. WODCON IV, November 1995, Amsterdam, The Netherlands.

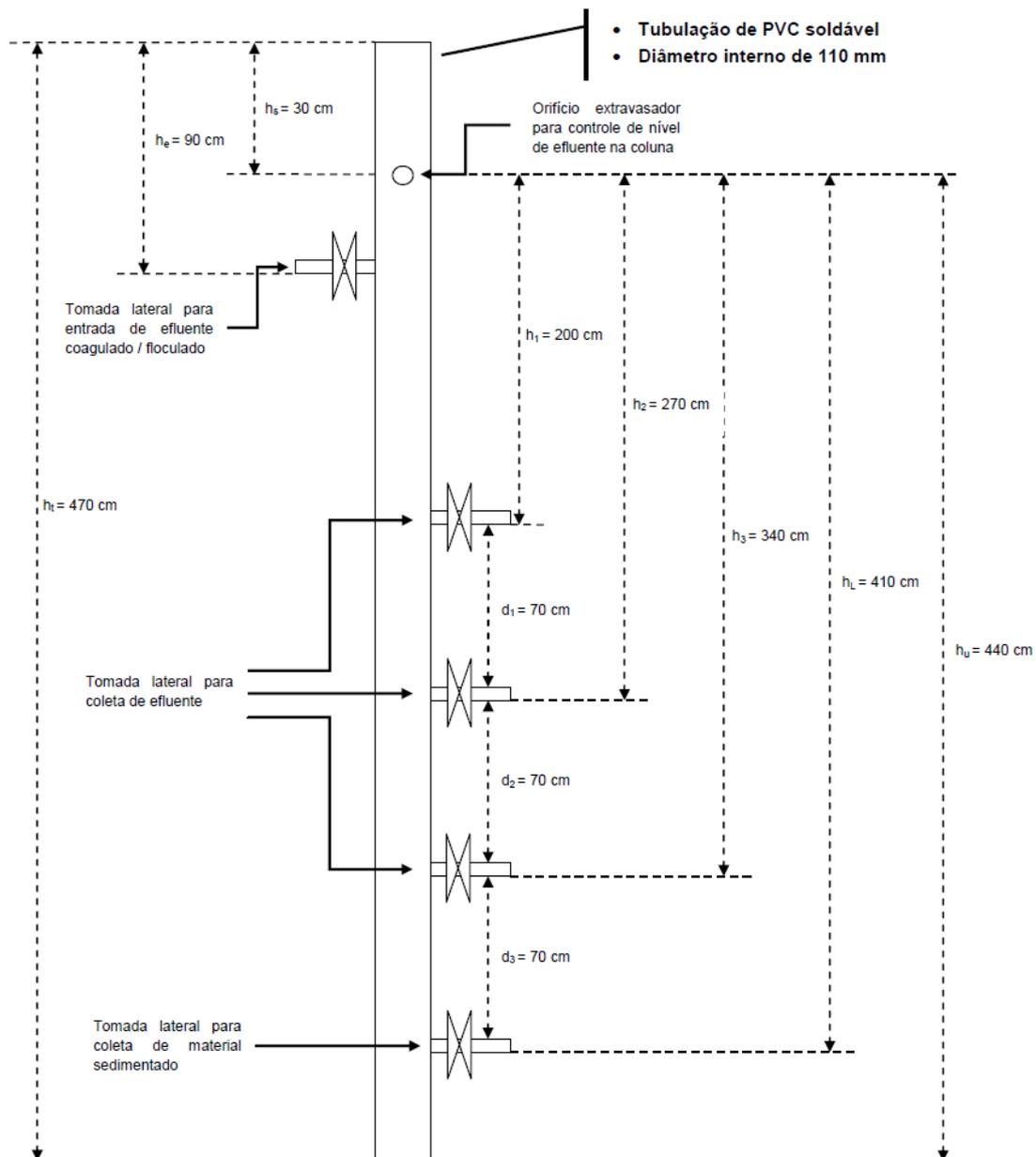
VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

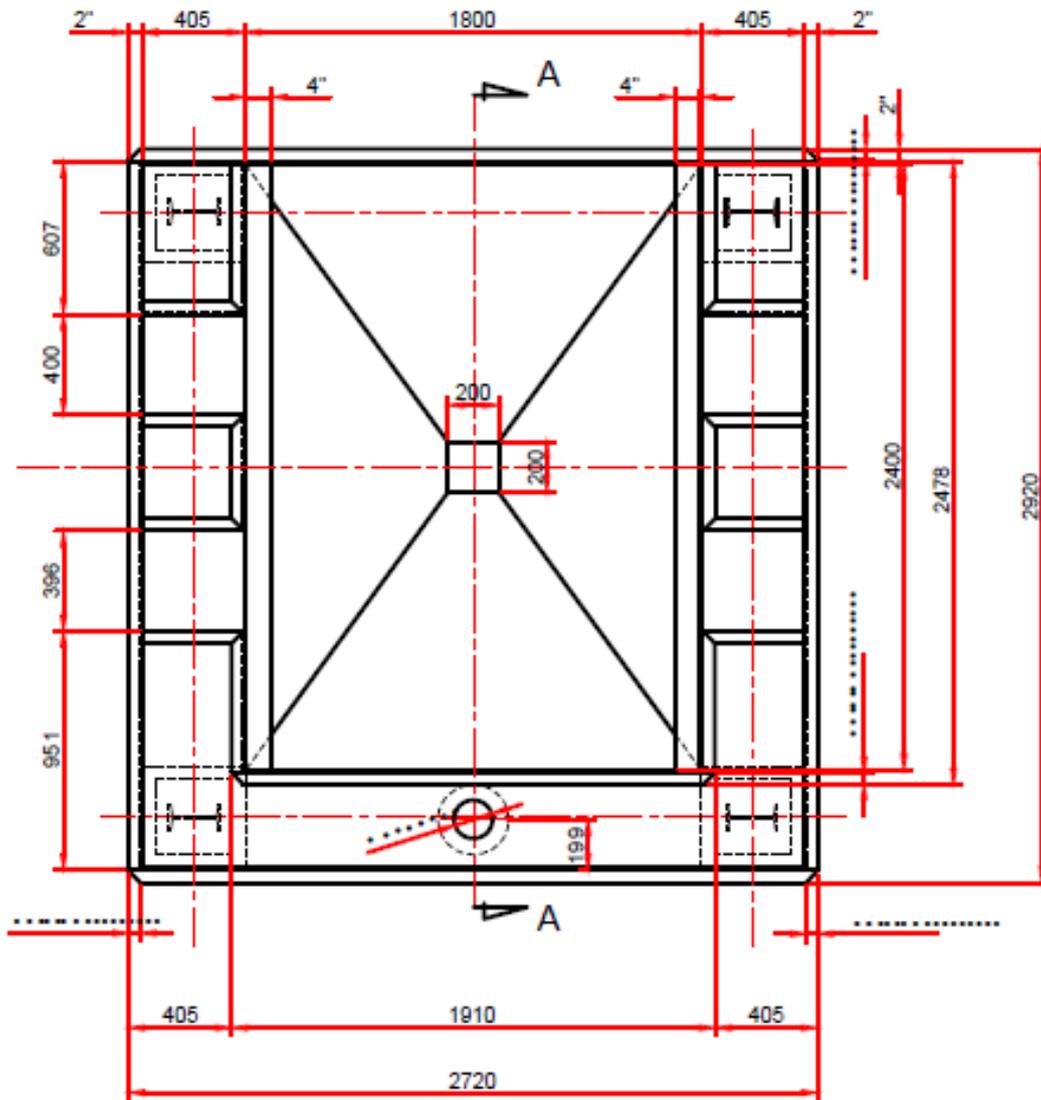
VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos de tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

YAO, K. M. **Theoretical Study of High-Rate Sedimentation**. Journal of the Water Pollution Control Federation , Vol. 42, n. 2, p: 218 - 288, Feb.1970, USA.

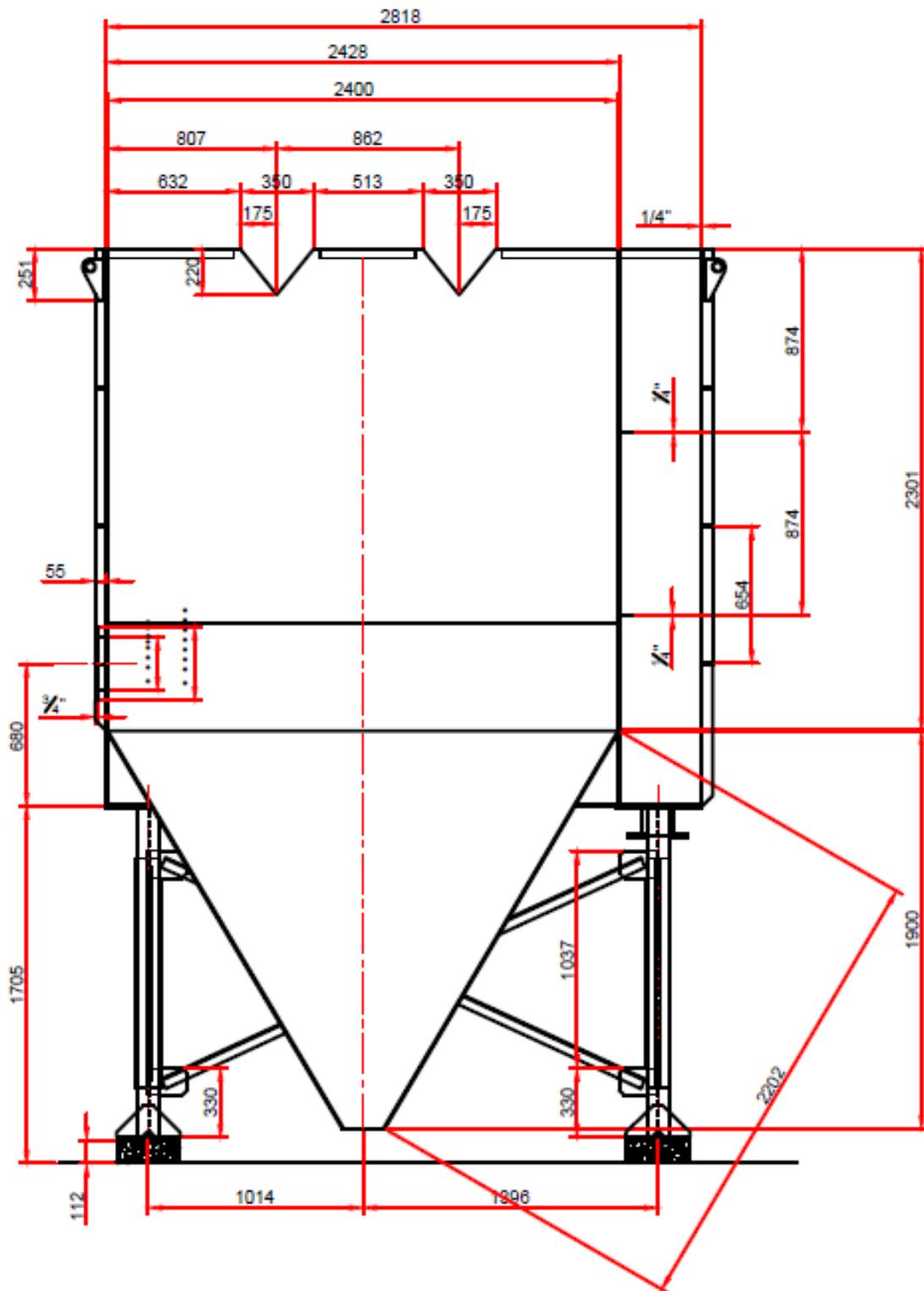
APÊNDICES

APÊNDICE A – Detalhes e dimensões (mm) de projeto da coluna de sedimentação

**CORTE AA**



VISTA SUPERIOR



CORTE AA

APÊNDICE C – Gráficos com as curvas obtidas nos ensaios em coluna de sedimentação (ECS)

Gráfico 3 – Curva obtida com os resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente em função das velocidades de sedimentação (V_S) referente ao ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU

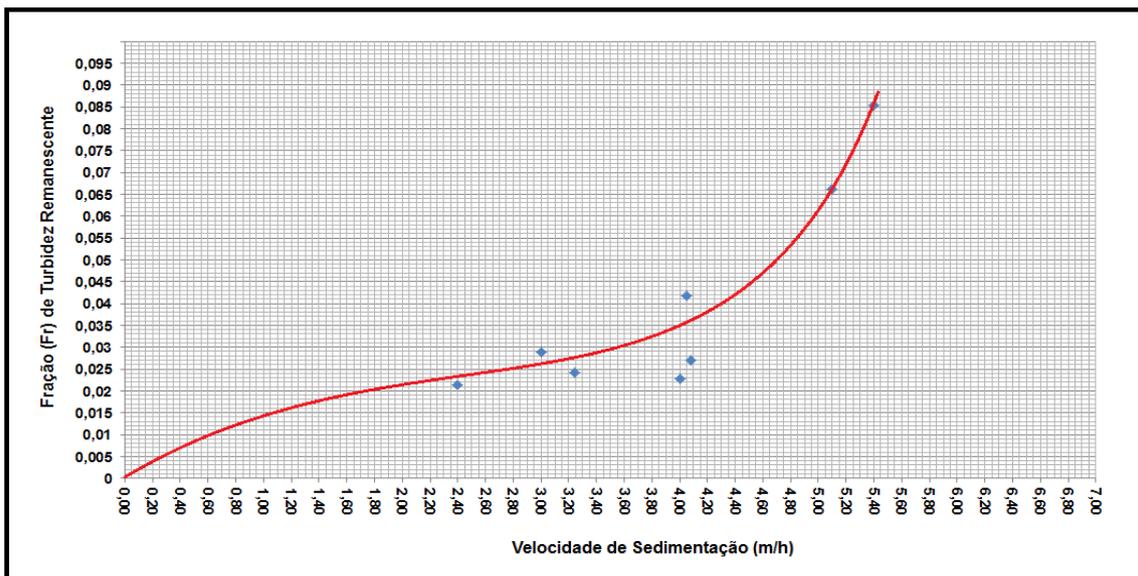


Gráfico 4 – Curva obtida com os resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente em função das velocidades de sedimentação (V_S) referente ao ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU

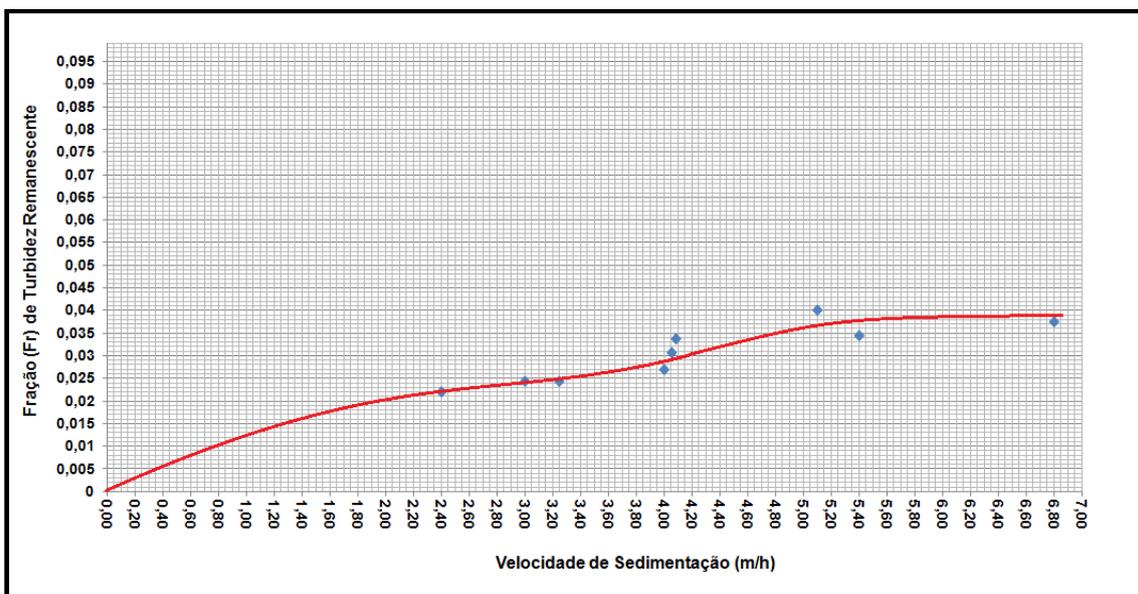
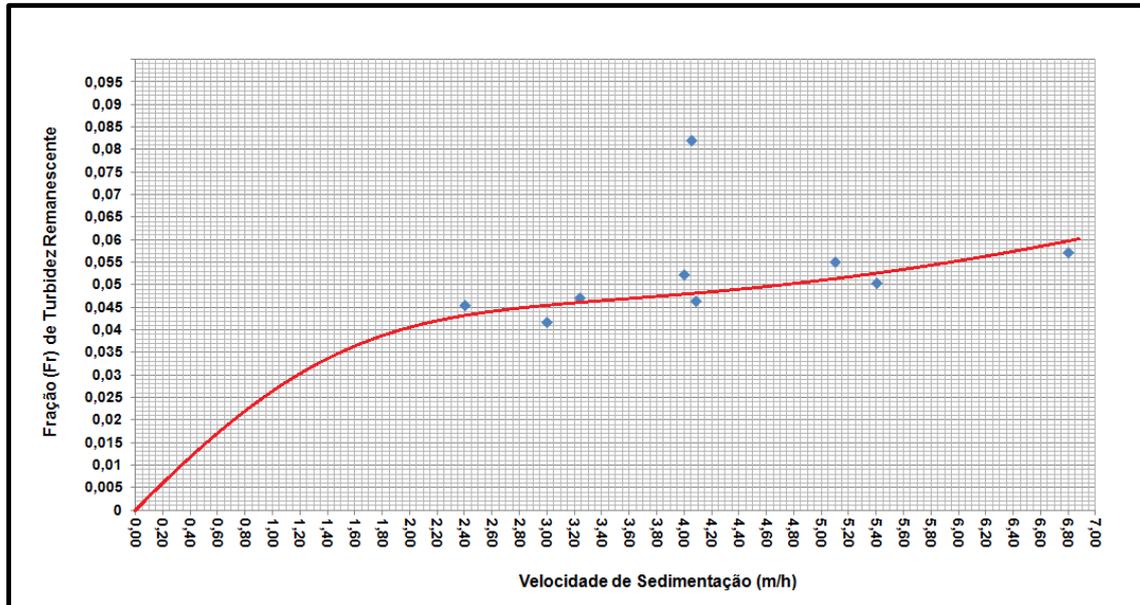


Gráfico 5 – Curva obtida com os resultados de fração (Fr) de turbidez remanescente em função das velocidades de sedimentação (V_s) referente ao ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU



APÊNDICE D – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 984 NTU

Gráfico 6 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,2 m/h

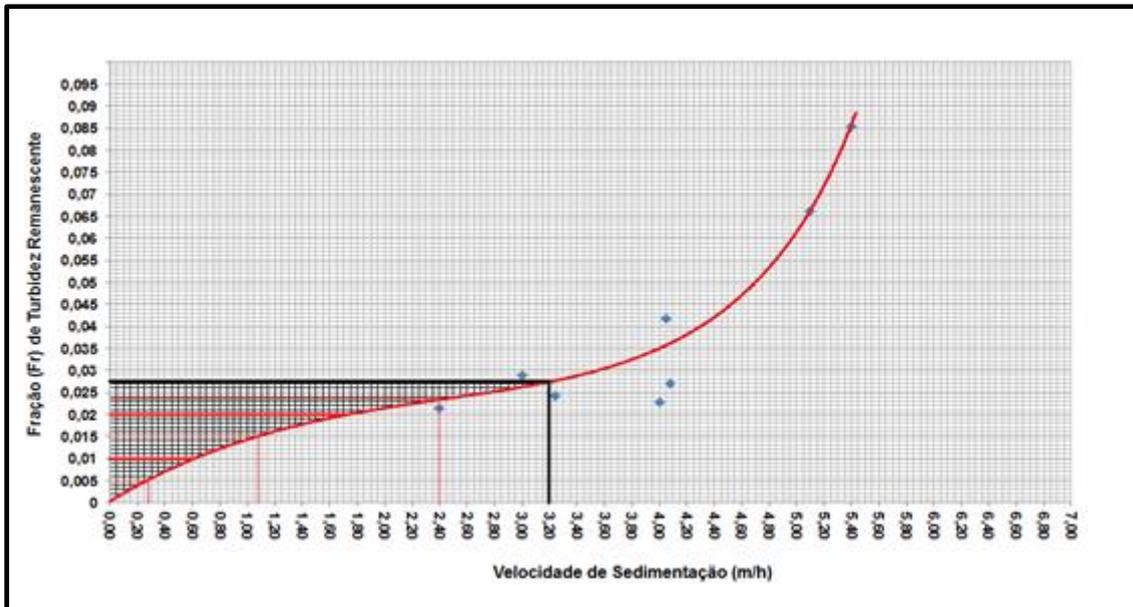


Gráfico 7 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,0 m/h

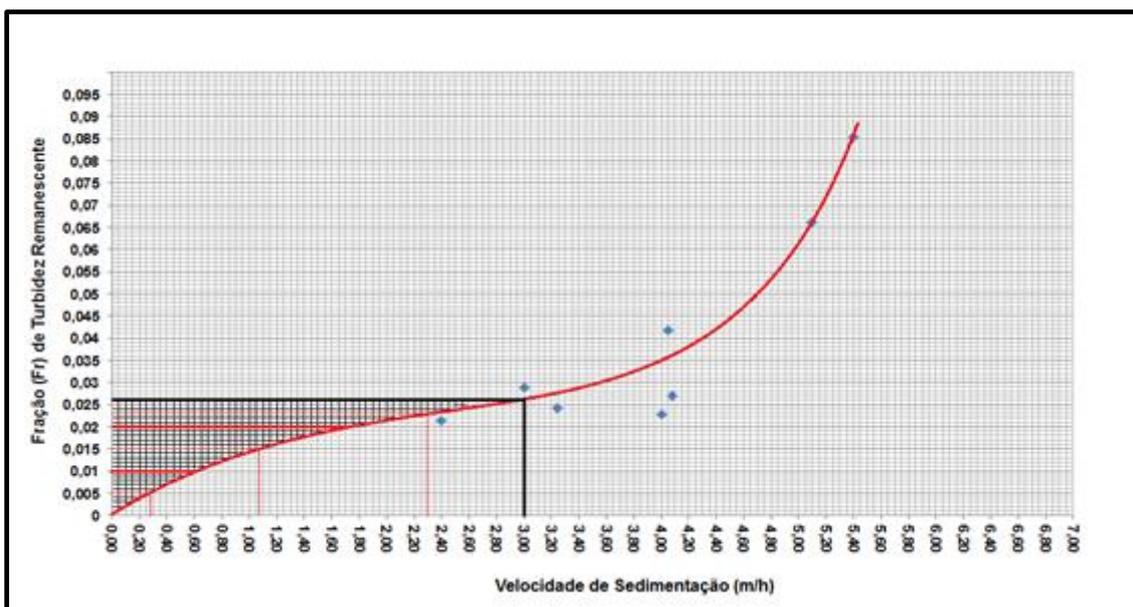


Gráfico 8 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,8 m/h

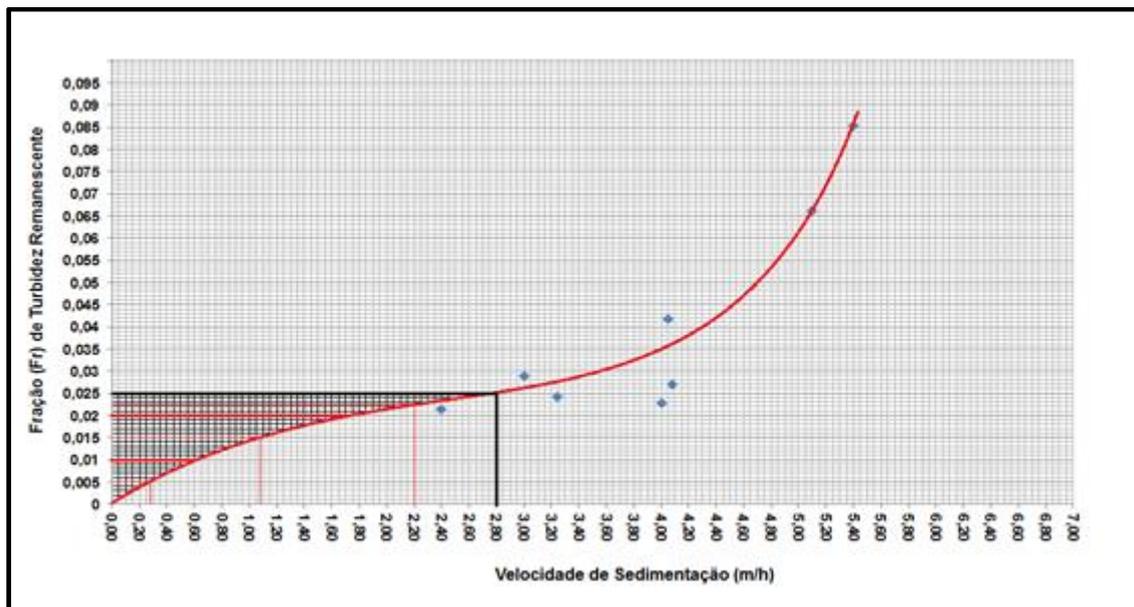


Gráfico 9 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,6 m/h

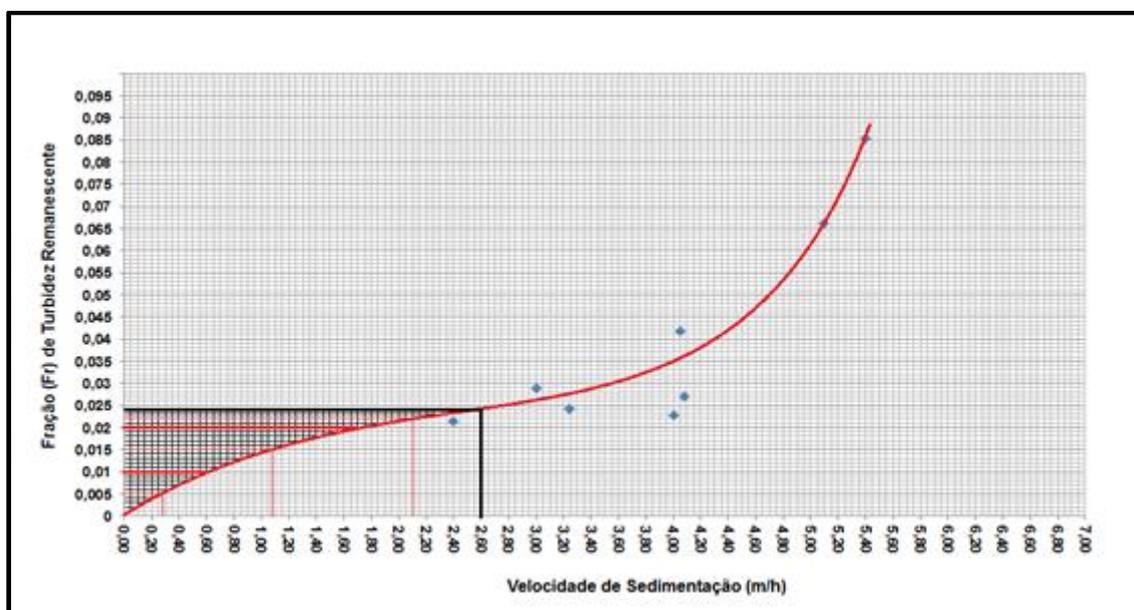


Gráfico 10 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,4 m/h

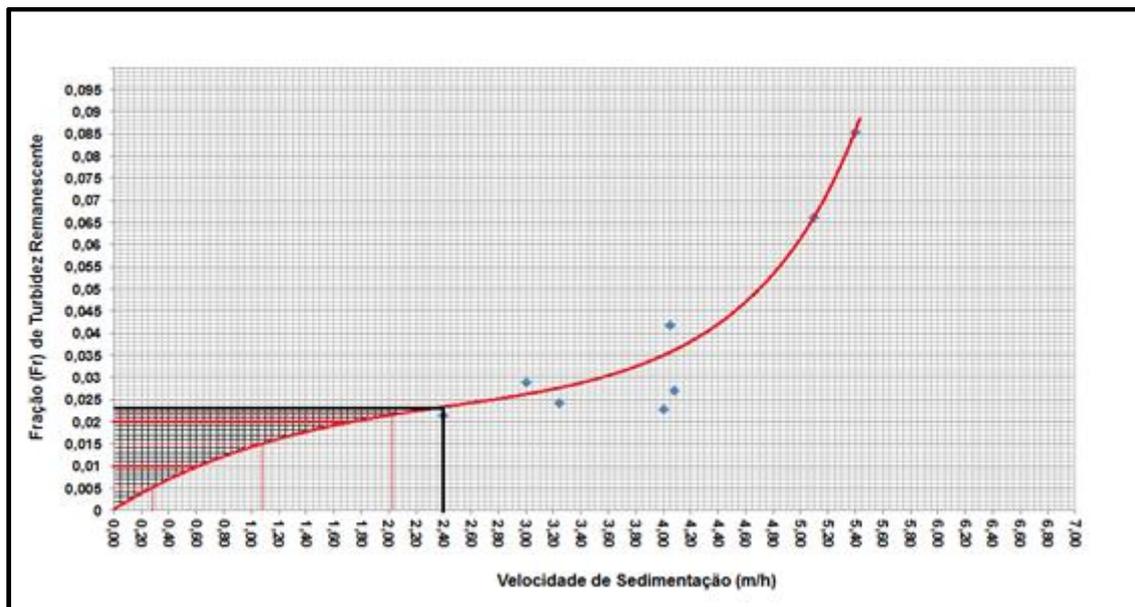


Gráfico 11 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,2 m/h

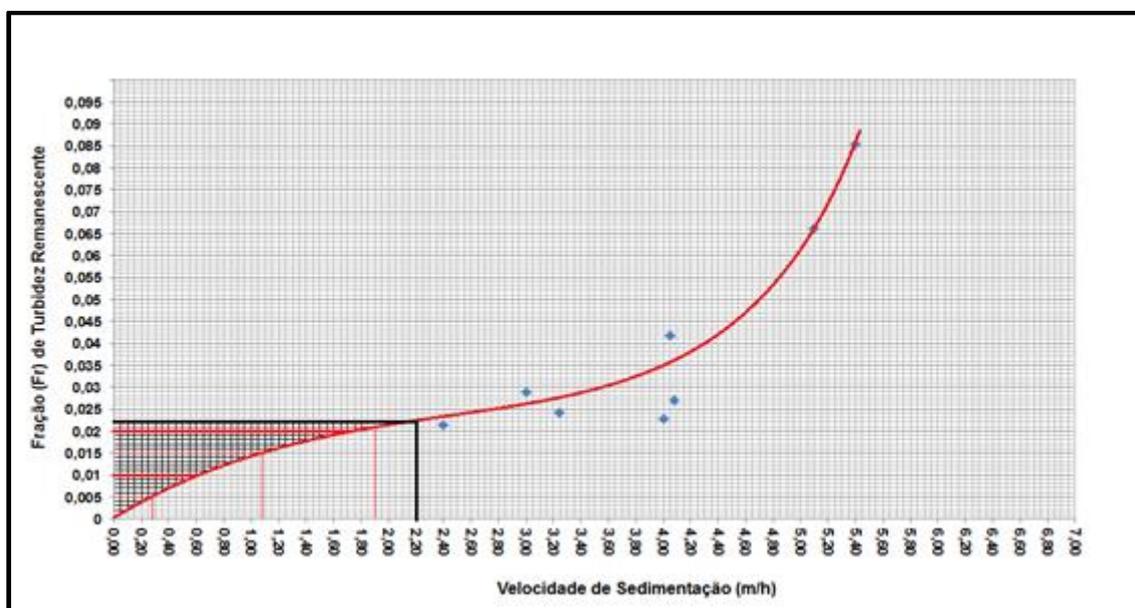


Gráfico 12 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,0 m/h

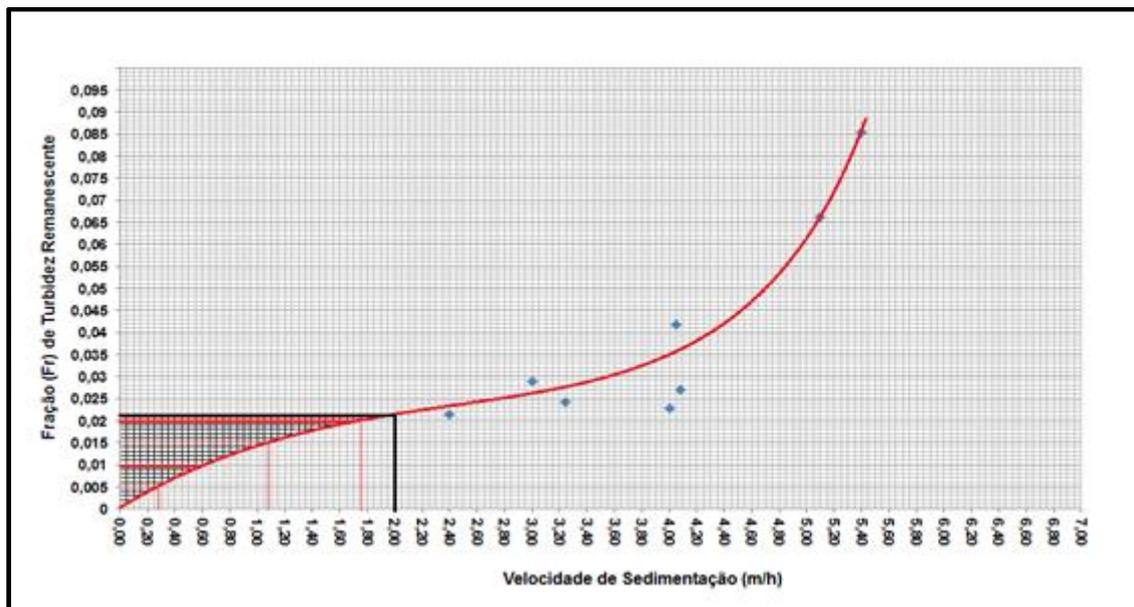


Gráfico 13 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,8 m/h

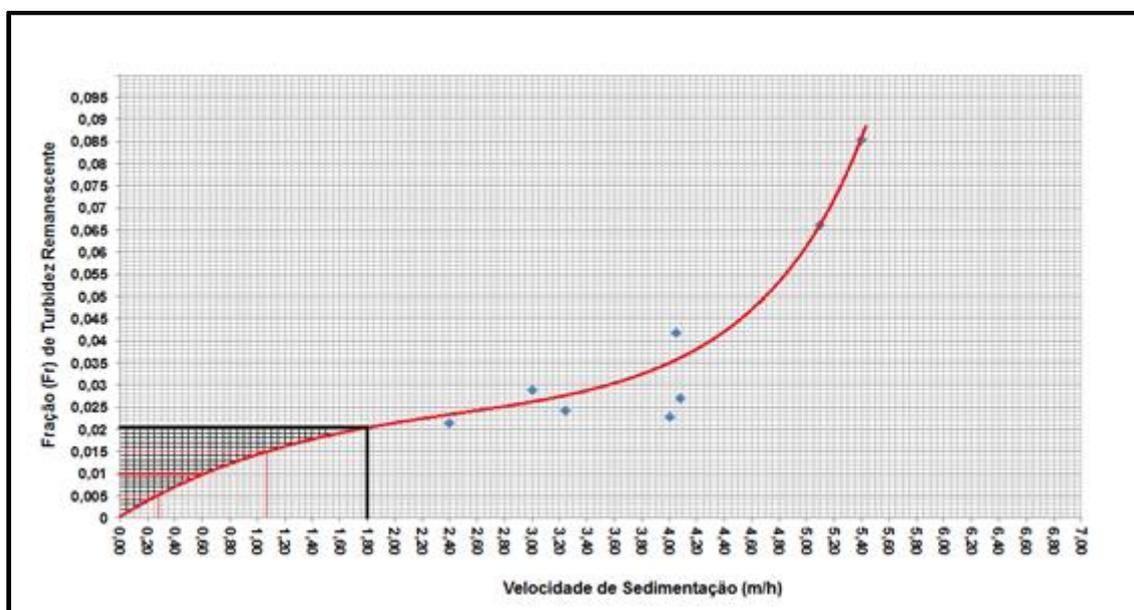


Gráfico 14 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,6 m/h

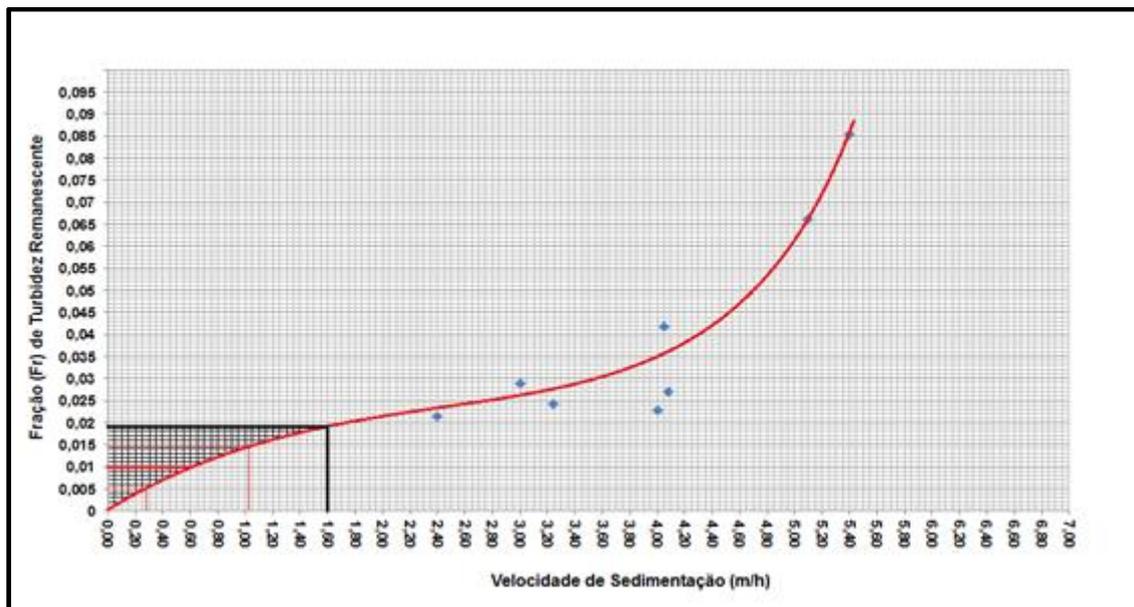
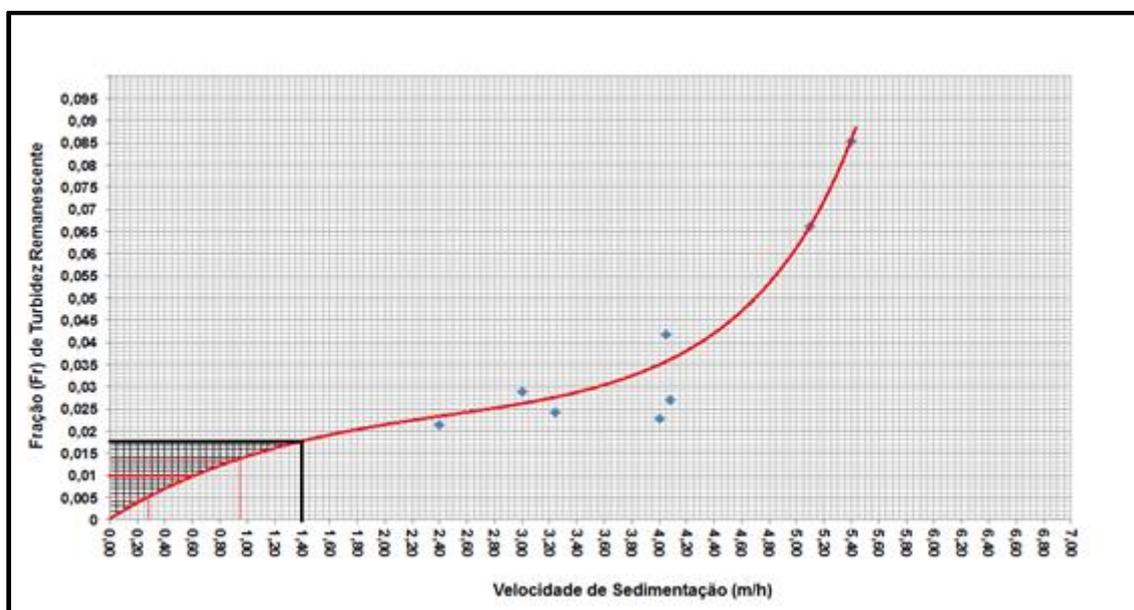


Gráfico 15 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,4 m/h



APÊNDICE E – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 644 NTU

Gráfico 16 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,2 m/h

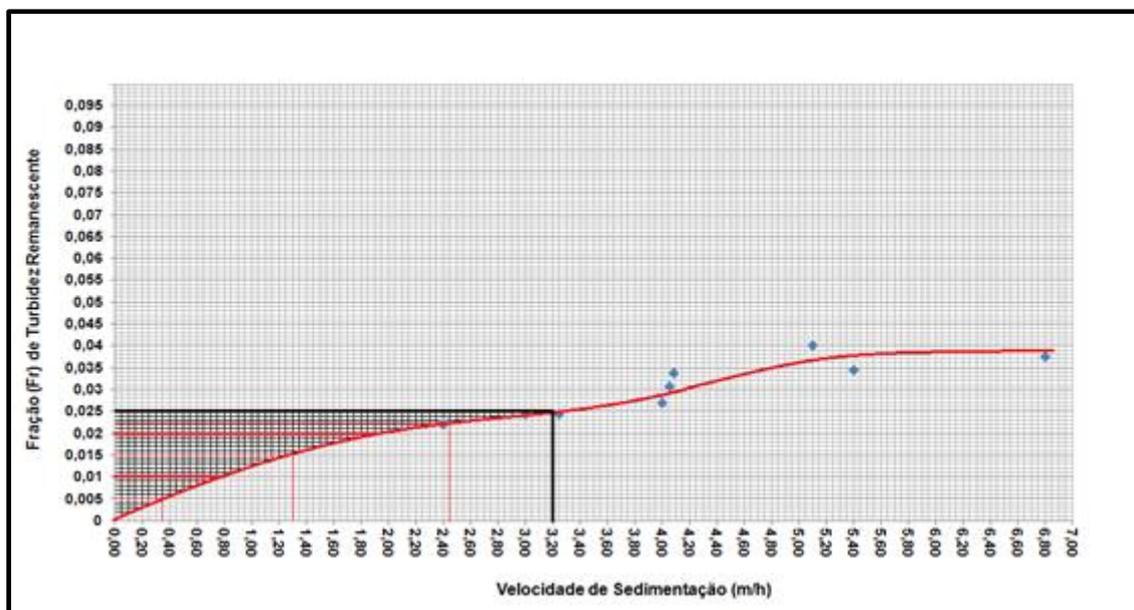


Gráfico 17 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,0 m/h

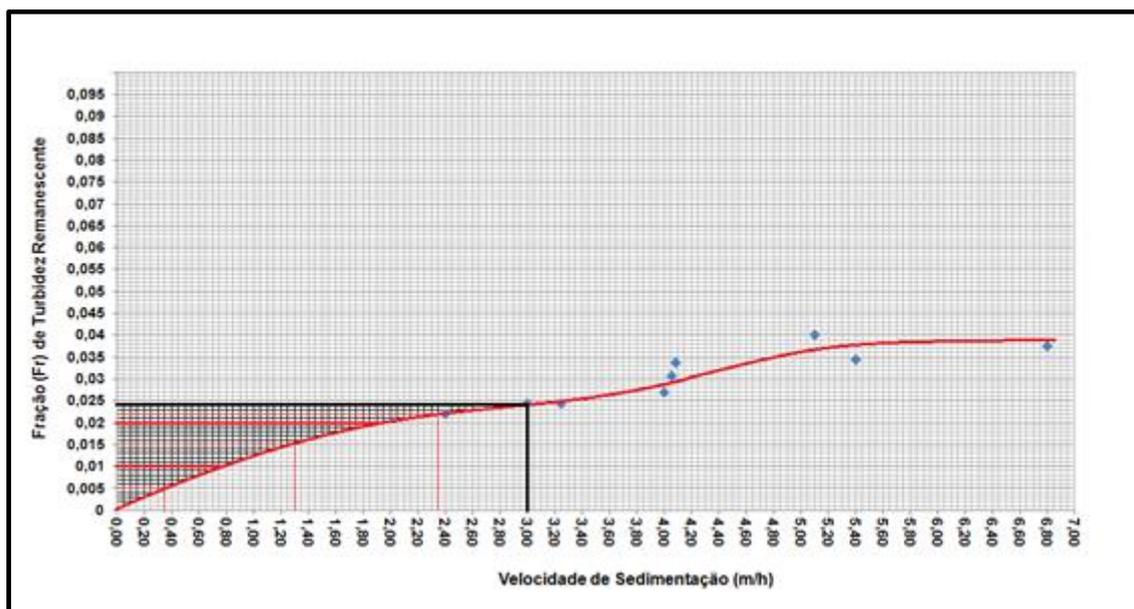


Gráfico 18 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,8 m/h

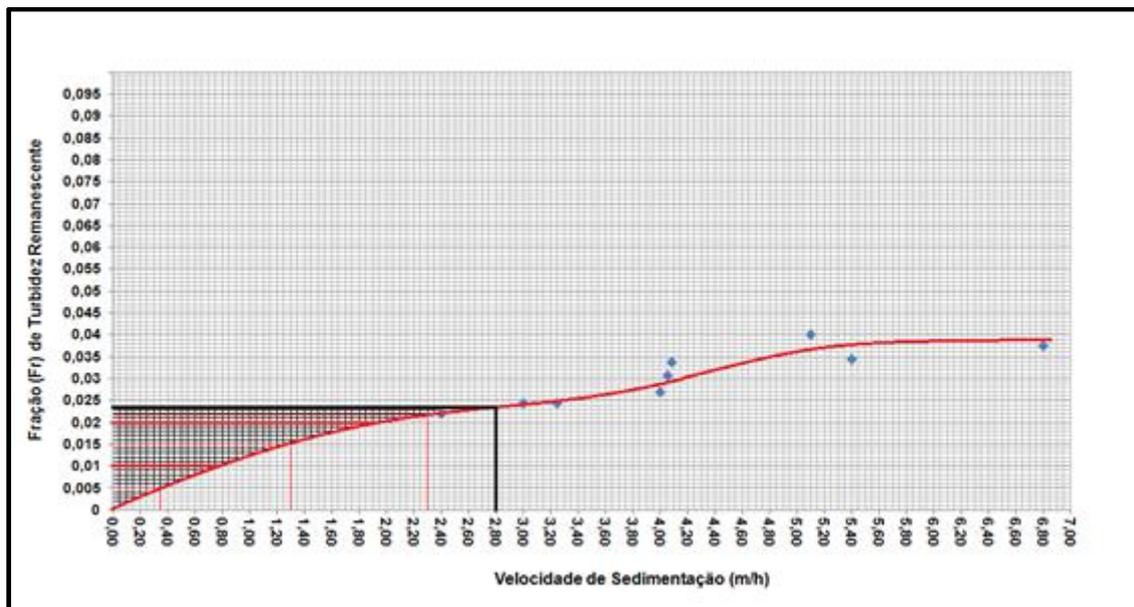


Gráfico 19 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,6 m/h

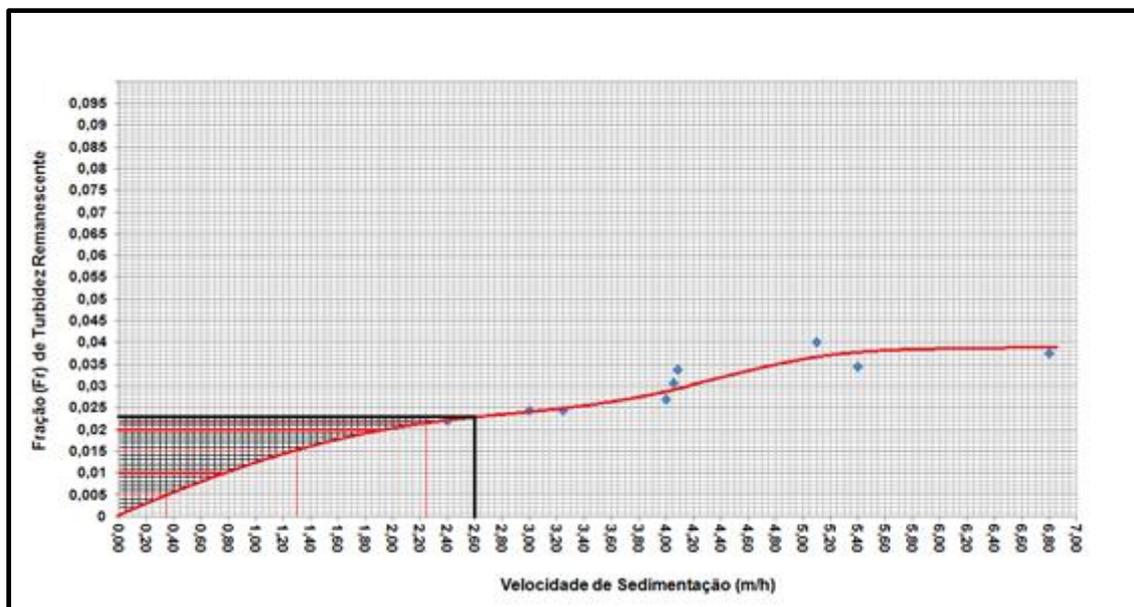


Gráfico 20 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,4 m/h

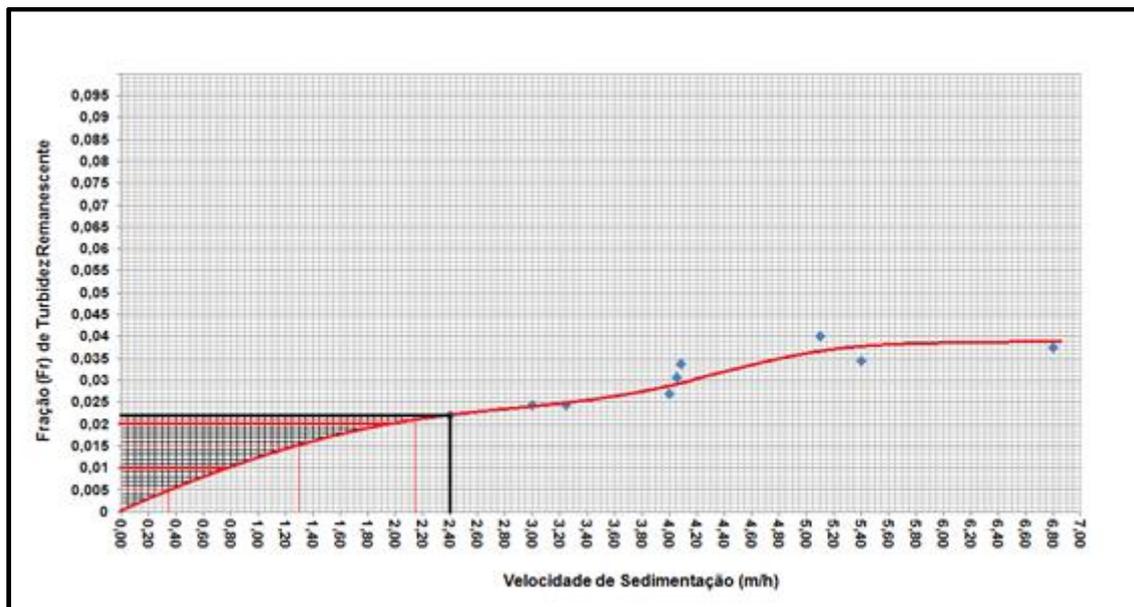


Gráfico 21 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,2 m/h

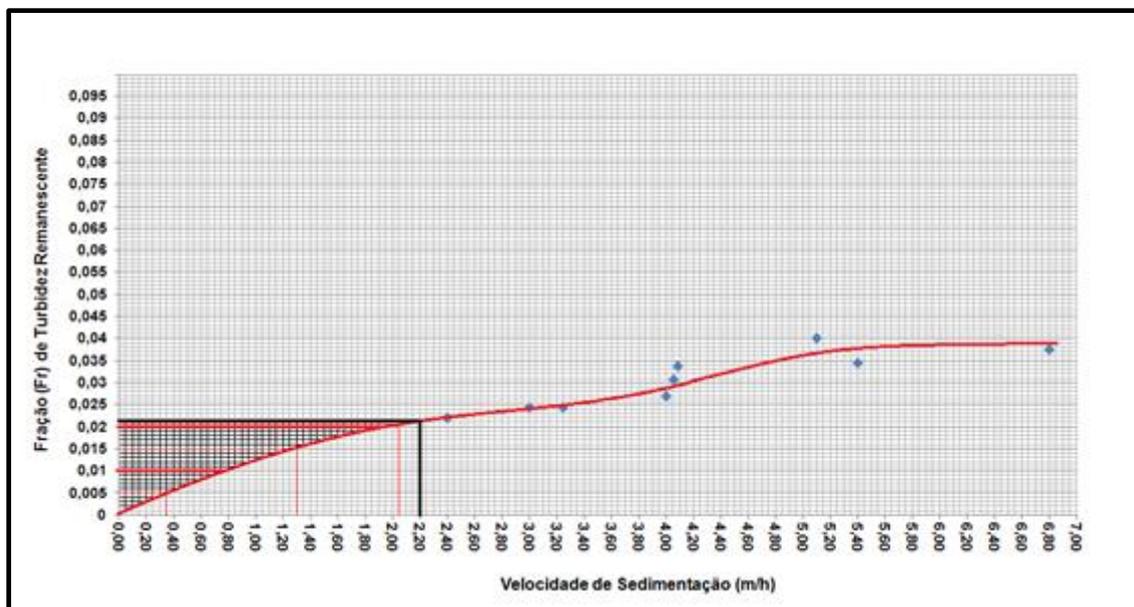


Gráfico 22 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,0 m/h

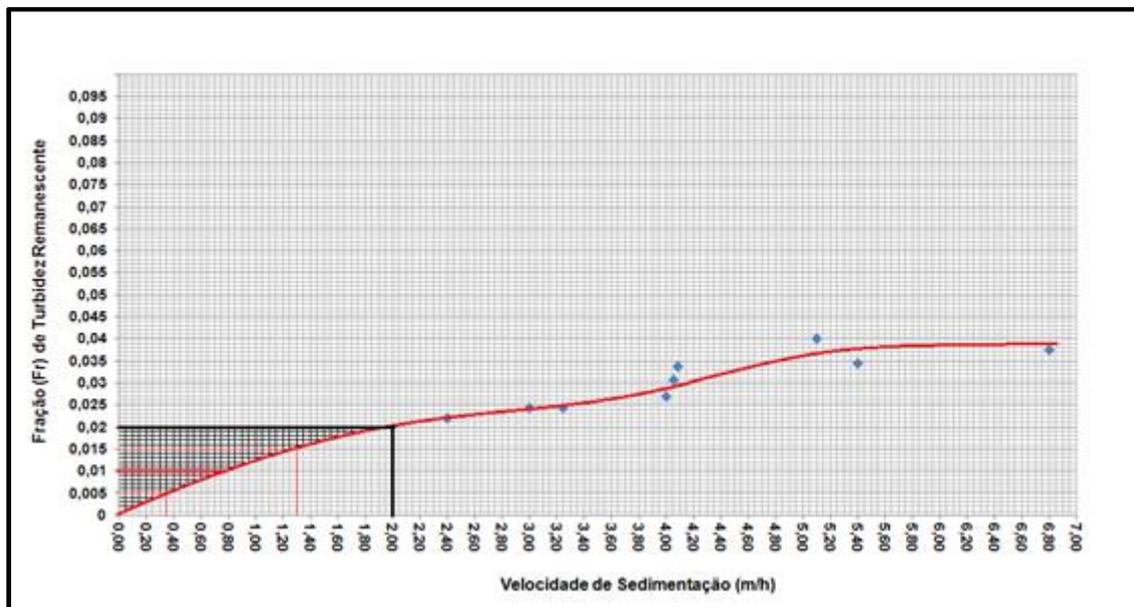


Gráfico 23 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,8 m/h

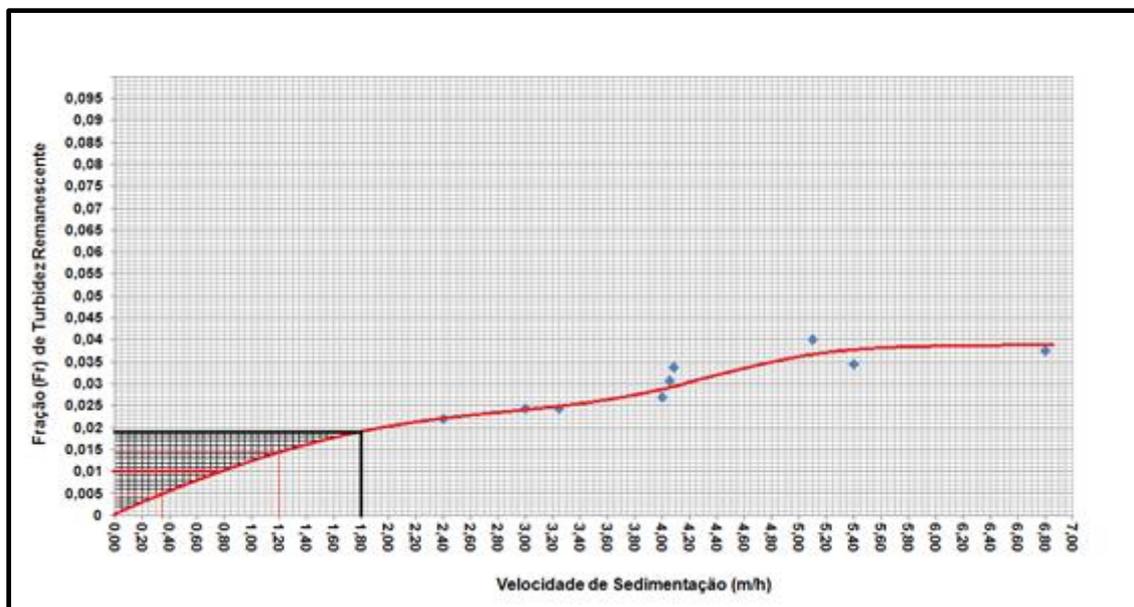


Gráfico 24 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,6 m/h

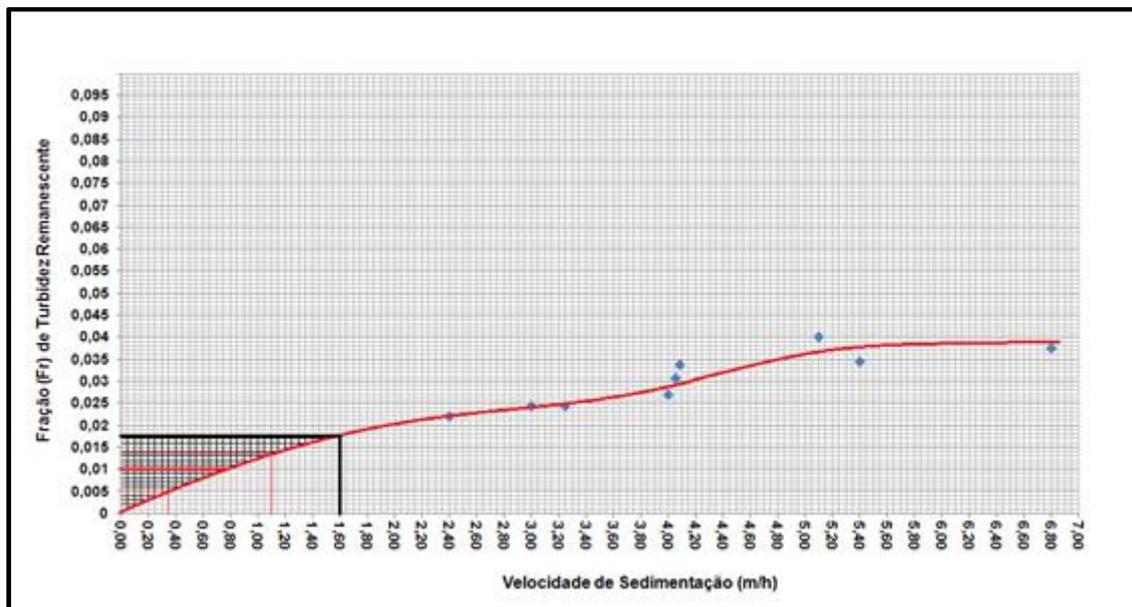
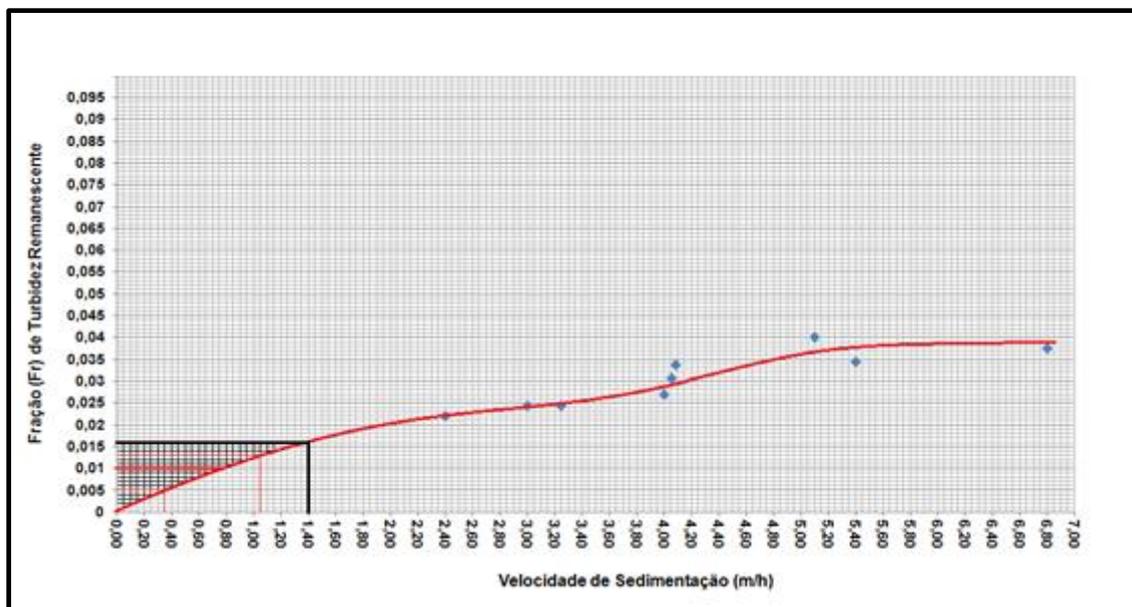


Gráfico 25 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,4 m/h



APÊNDICE F – Gráficos do ensaio em coluna de sedimentação (ECS) com efluente bruto com valor médio de turbidez (S_0) de 241 NTU

Gráfico 26 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,2 m/h

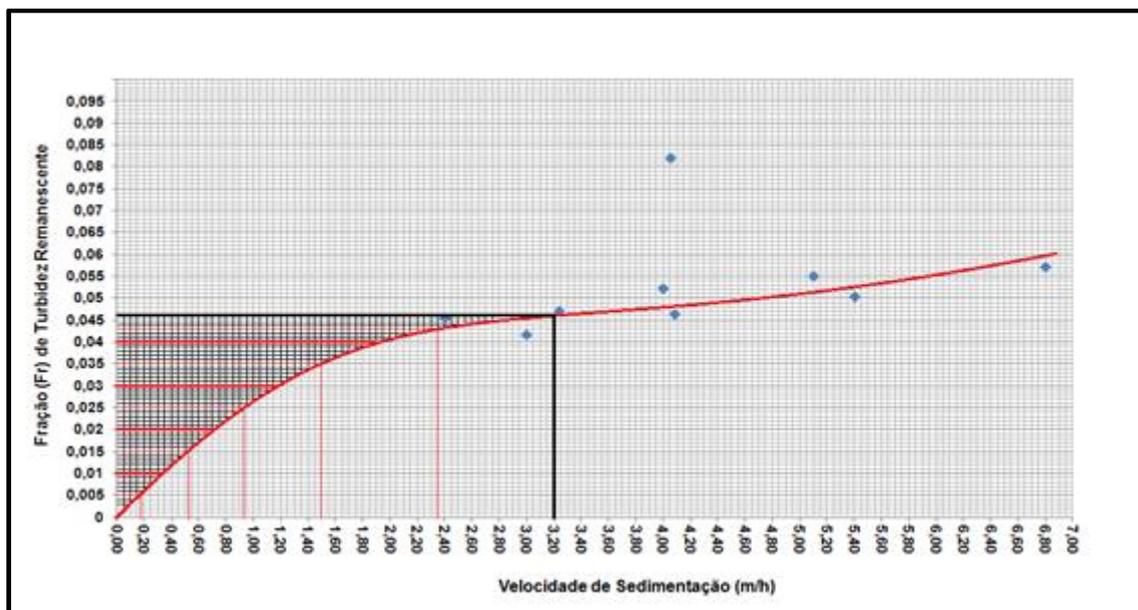


Gráfico 27 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 3,0 m/h

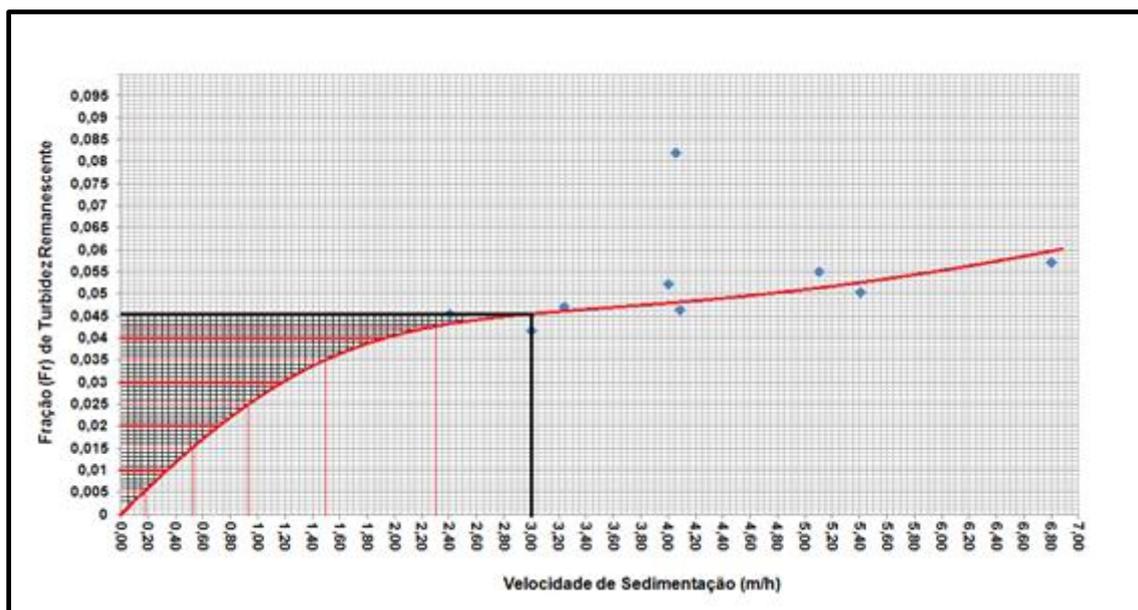


Gráfico 28 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,8 m/h

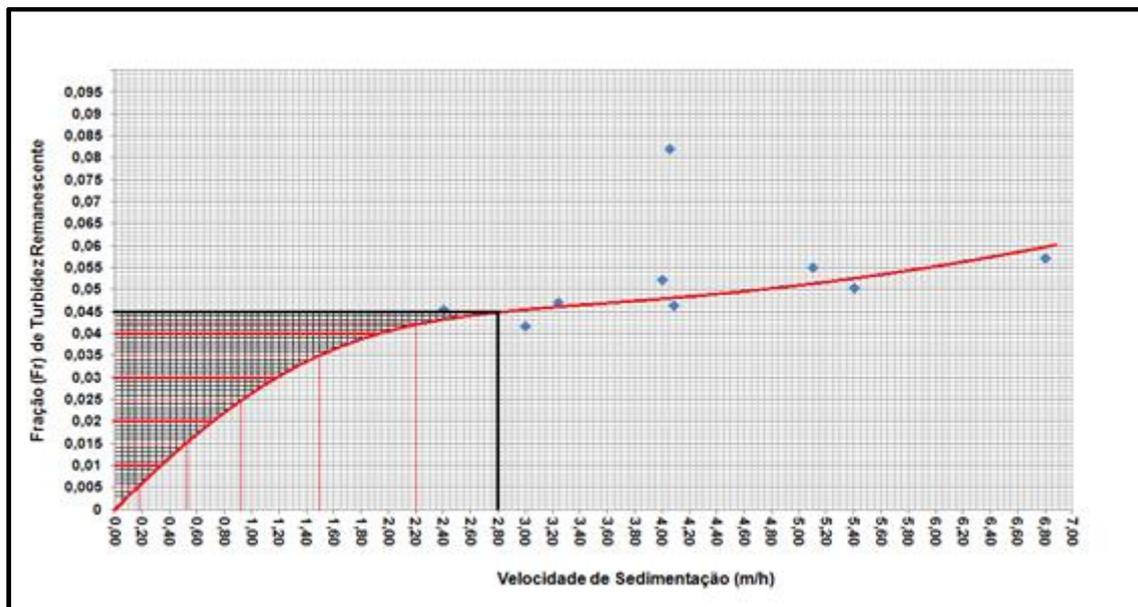


Gráfico 29 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,6 m/h

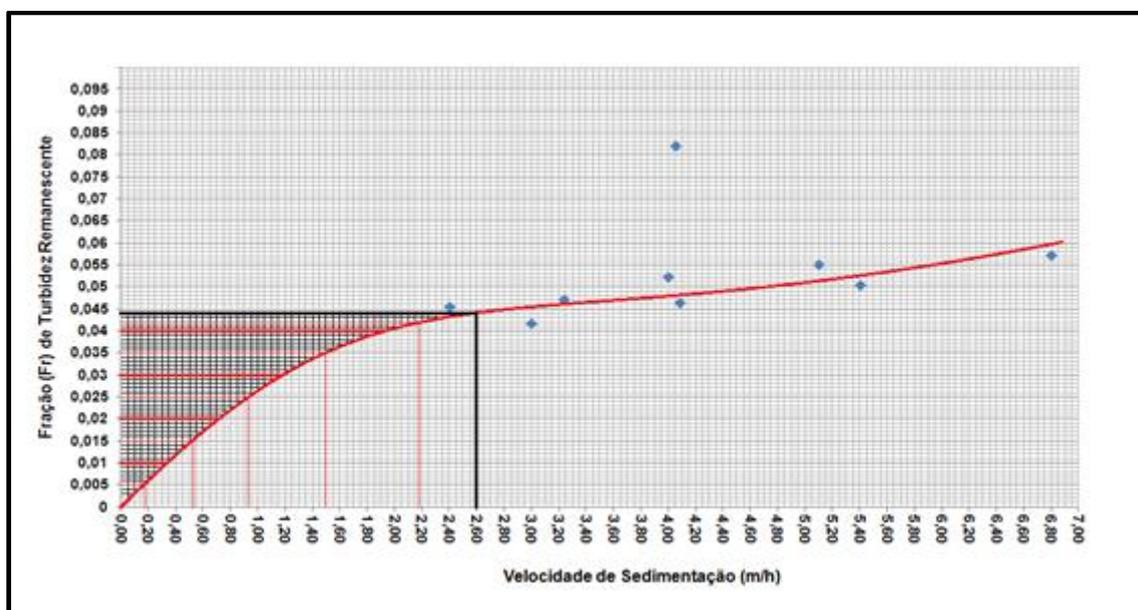


Gráfico 30 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,4 m/h

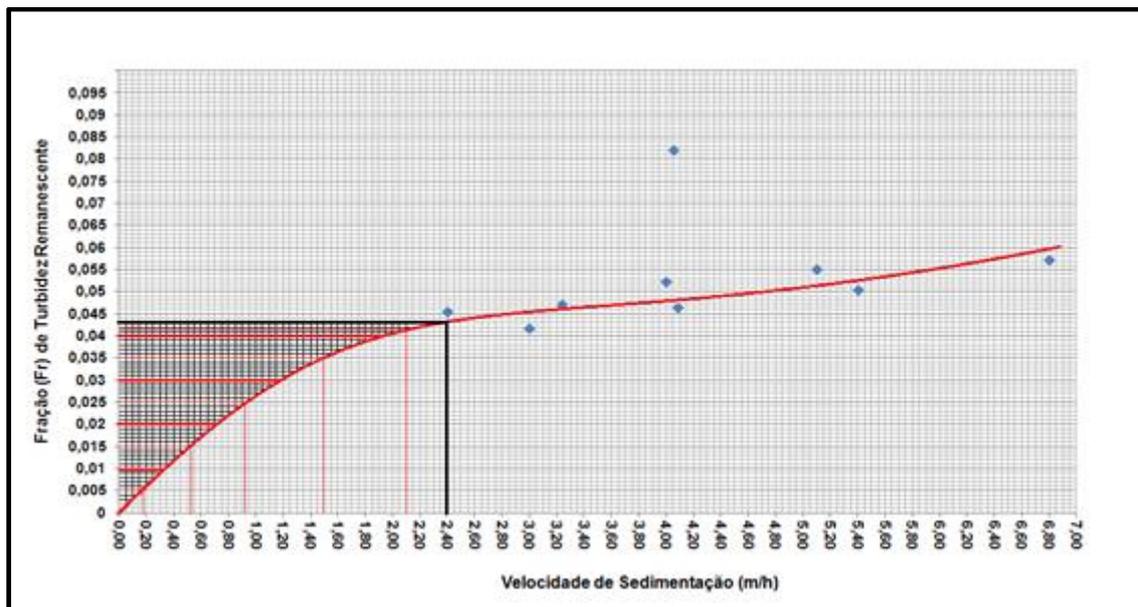


Gráfico 31 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,2 m/h

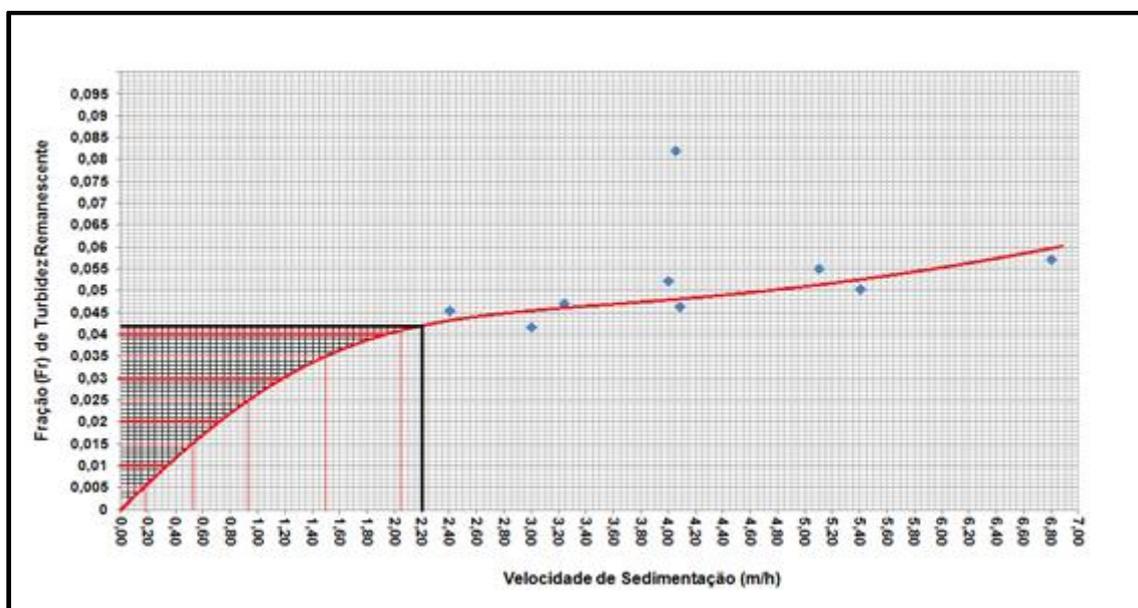


Gráfico 32 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 2,0 m/h

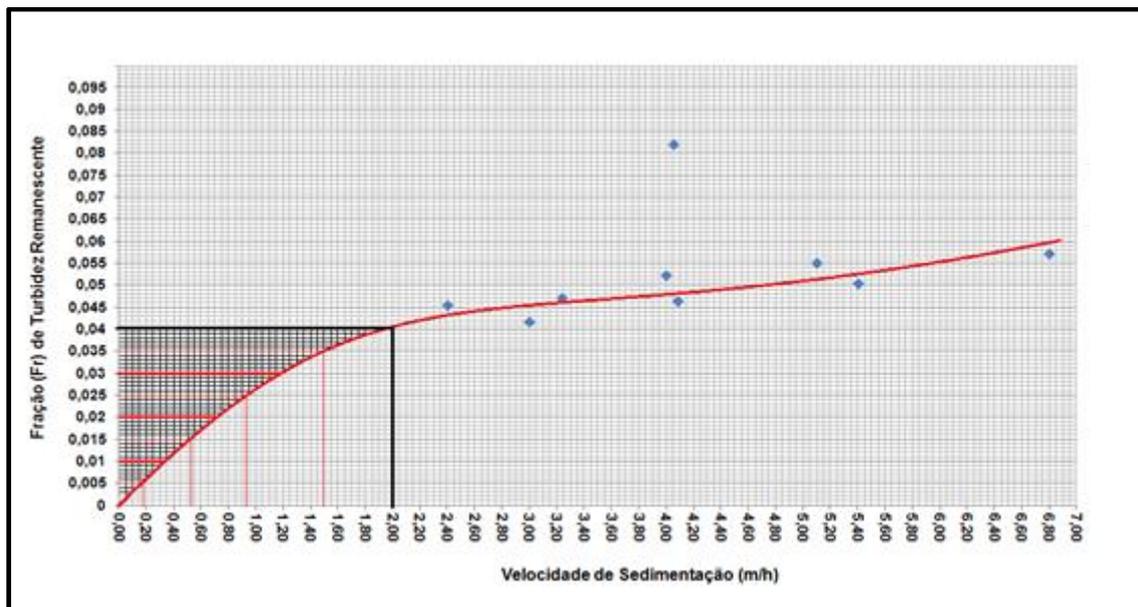


Gráfico 33 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,8 m/h

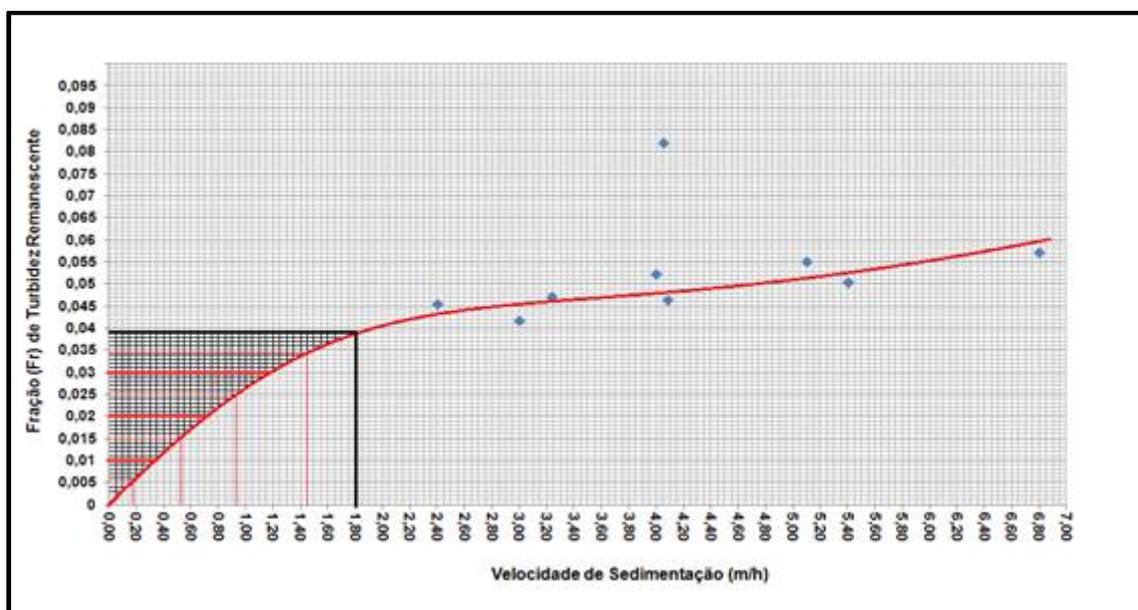


Gráfico 34 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,6 m/h

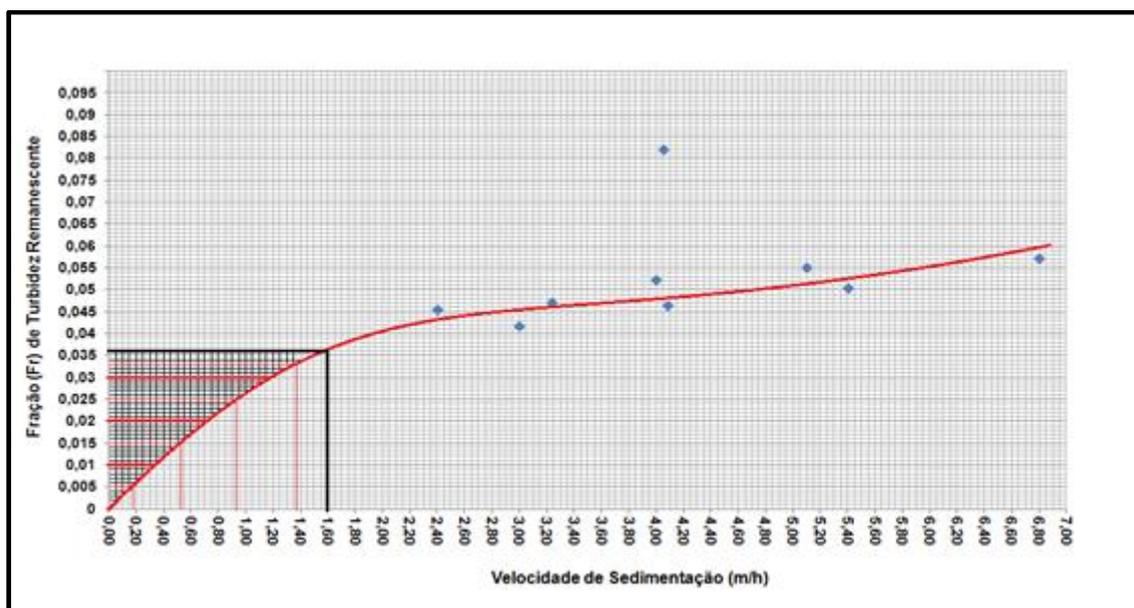
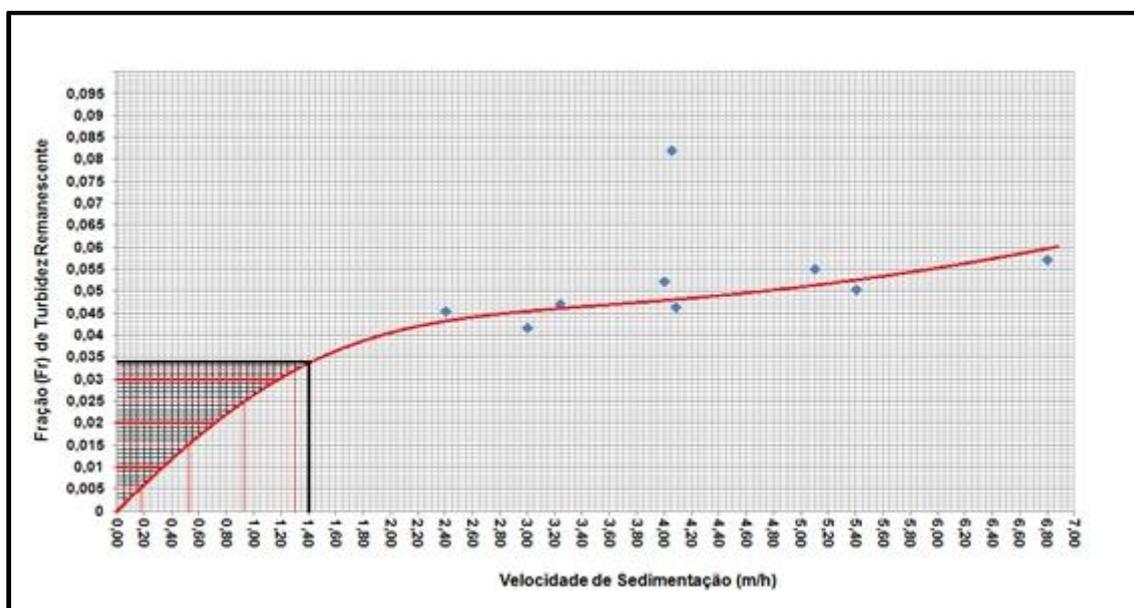
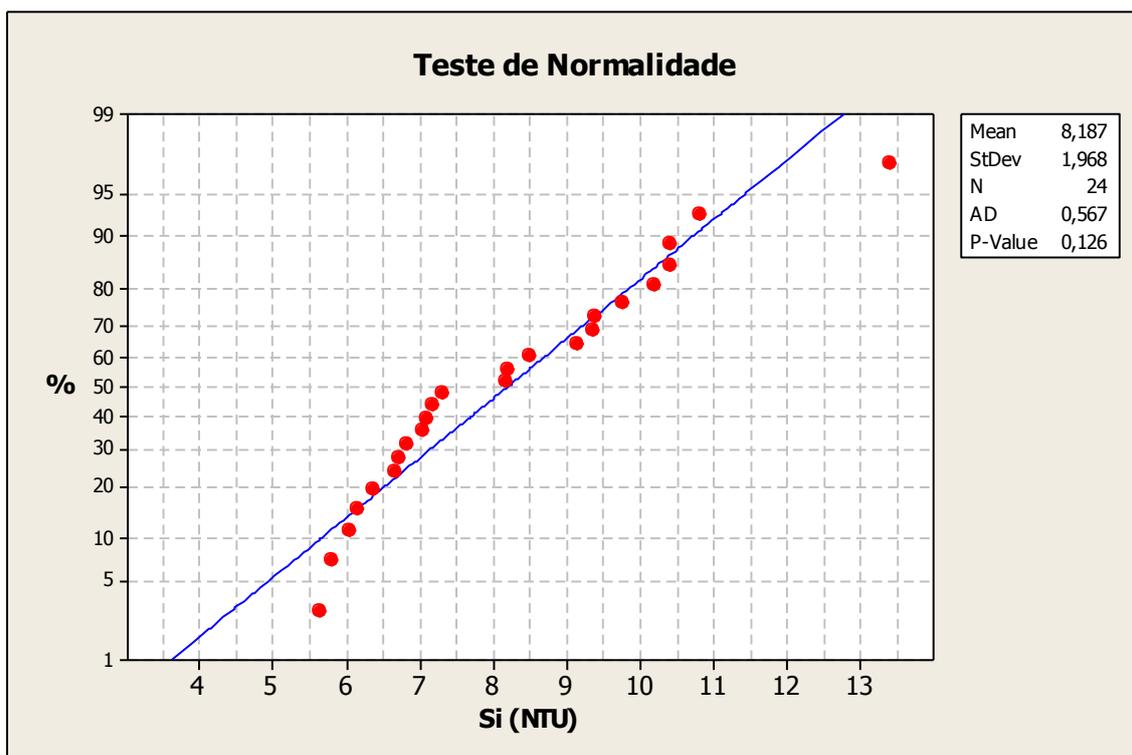


Gráfico 35 – Divisão em faixas de largura dx_i de cada área formada para a velocidade crítica de sedimentação (V_{cs}) de 1,4 m/h



APÊNDICE G – Informações do teste de normalidade (Anderson – Darling) para os valores de turbidez remanescente (S_i) obtidos durante a operação do novo módulo de decantação (NMD)

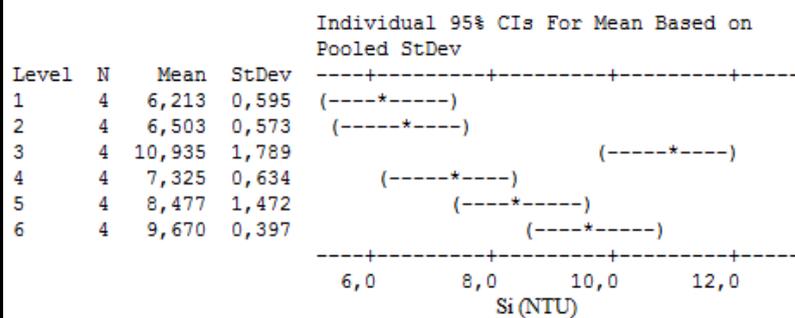


APÊNDICE H – Informações do teste de hipóteses ANOVA para os valores de turbidez remanescente (Si) obtidos durante a operação do novo módulo de decantação (NMD)

One-way ANOVA: Si versus So

Source	DF	SS	MS	F	P
Concentrações Entrada	5	69,26	13,85	12,57	0,000
Error	18	19,83	1,10		
Total	23	89,09			

S = 1,050 R-Sq = 77,74% R-Sq(adj) = 71,56%



Pooled StDev = 1,050

Hipoteses:

H0 = não existe diferença entre os valores de Si para diferentes valores de So no efluente bruto

H1 = existe diferença entre os valores de Si para diferentes valores de So no efluente bruto

P >= 0,05 - aceita H0, ou seja, não existe diferença entre os valores de Si para diferentes valores de So no efluente bruto.

P < 0,05 - rejeita H0, ou seja, existe diferença entre os valores de Si para diferentes valores de So no efluente bruto.