



# DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, BALANÇO DE MASSA E  
AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DA UNIDADE DE  
DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE  
EFLUENTE DE REFINARIA DE ALUMINA**

**DISCENTE: ELAINE C. DOS DANTOS CUNHA DE OLIVEIRA  
ORIENTADOR: PROF.DR. RUI GUILHERME C. DE M. ALVES**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

**BELÉM (2024)**





ELAINE CRISTINA DOS SANTOS CUNHA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, BALANÇO DE MASSA E AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DA UNIDADE DE DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINARIA DE ALUMINA.**

BELÉM

2024



ELAINE CRISTINA DOS SANTOS CUNHA DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, BALANÇO DE MASSA E AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DA UNIDADE DE DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINARIA DE ALUMINA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará (PPGESA-UFPA), como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Linha de Pesquisa: Planejamento, Monitoramento, Operação e Controle de Sistemas de Saneamento

.

Orientador: Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves

BELÉM



2024

ELAINE CRISTINA DOS SANTOS CUNHA DE OLIVEIRA


**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, BALANÇO DE MASSA E AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO DA UNIDADE DE DECANTAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE REFINARIA DE ALUMINA.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação de Mestrado Profissional em Engenharia Sanitária e Ambiental do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves

Data da avaliação: 04/07/2024


Examinada por: Aprovado

Documento assinado digitalmente  
 **RUI GUILHERME CAVALEIRO DE MACEDO ALVES**  
Data: 01/10/2024 12:24:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---


Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves

(PPGESA/ITEC/UFPA - Orientador)

Documento assinado digitalmente  
 **NEYSON MARTINS MENDONÇA**  
Data: 21/09/2024 18:14:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça

Documento assinado digitalmente  
 **JADER VIEIRA LEITE**  
Data: 21/09/2024 23:15:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Jader Vieira Leite

(H2Q Distribuidora de Produtos Químicos Ltda - Membro Externo)



Dedico este trabalho à minha família, por  
todo amor e carinho.



## RESUMO

A pesquisa visou avaliar os aspectos físicos da fase líquida e da fase sólida, bem como apreciar o desempenho dos decantadores de uma ETEI, localizada em Barcarena, através do balanço de massa e da comparação da TAH e a taxa de aplicação de sólidos (TAS) com referências de projeto e normatizados. Foram monitoradas duas das quatro linhas de decantadores da ETEI em estudo, em dois dias consecutivos foram coletadas amostras da fase líquida da entrada e saída, e da fase sólida o lodo da ETEI. As análises foram executadas no Laboratório da Universidade Federal do Pará (LAESA), conjuntamente às análises de sólidos foram consultados dados de vazão por instrumentos de monitoramentos on line, assim como, dados de projetos em arquivos técnico e levantamento de referências normativas e bibliográfica. Com os resultados obtidos foi possível concluir a concentração de sólidos totais é maior no Decantador 82E quando comparado ao Decantador 82C. O resultado da análise de sólidos permitiu avaliar também o percentual superior na parcela de sólidos suspensos fixos, isto é, indicando característica de carga inorgânica superior. Sobre o balanço de massa observa-se uma geração de sólidos no interior dos decantadores se deve ao fato inerente ao processo que se refere a presença de soda cáustica no efluente bruto, alinhada a reação de neutralização que ocorre no meio pelo uso de ácido sulfúrico, formando o sulfato de sódio como subproduto do processo de tratamento, logo este acréscimo de sólidos é expresso em termos de sólidos dissolvidos. Sobre a avaliação da TAH observada nos dados monitorados superior ao mínimo indicado pelo Metcalf & Eddy (1991), mas manteve-se aderente a referência de projeto, compatível com comportamento das vazões em carga baixa. E nessa mesma lógica comparativa, a avaliação da TAS manteve-se em ambos os decantador 82C e o 82E uma taxa inferior ao mínimo indicado pelo Metcalf & Eddy (1991).

Palavras-chaves: lodo; balanço de massa; taxa de aplicação hidráulica; taxa de aplicação de sólidos.



## Abstract

The research aimed to evaluate the physical aspects of the liquid phase and the solid phase, as well as to evaluate the performance of the decanters of an ETEI, located in Barcarena, through the mass balance and comparison of the TAH and the solids application rate (TAS). with project references and standards. Two of the four lines of ETEI decanters under study were monitored, on two consecutive days samples were collected from the liquid phase at the inlet and outlet, and from the solid phase, the ETEI sludge. The analyzes were carried out at the Laboratory of the Federal University of Pará (LAESA), together with the solids analyses, flow data was consulted using online monitoring instruments, as well as project data in technical files and a survey of normative and bibliographical references. With the results obtained, it was possible to conclude that the concentration of total solids is higher in Decanter 82E when compared to Decanter 82C. The result of the solids analysis also made it possible to evaluate the higher percentage in the portion of fixed suspended solids, that is, indicating a higher inorganic load characteristic. Regarding the mass balance, a generation of solids inside the decanters is observed due to the fact inherent to the process which refers to the presence of caustic soda in the raw effluent, aligned with the neutralization reaction that occurs in the medium through the use of sulfuric acid, forming sodium sulfate as a by-product of the treatment process, therefore this increase in solids is expressed in terms of dissolved solids. Regarding the assessment of the TAH observed in the monitored data, it was higher than the minimum indicated by Metcalf & Eddy (1991), but it remained in line with the design reference, compatible with the behavior of flows at low load. And in this same comparative logic, the TAS evaluation remained in both decanter 82C and 82E at a rate lower than the minimum indicated by Metcalf & Eddy (1991).

**Keywords:** slime; mass balance; hydraulic application rate; solids application rate.



## Lista de Figuras

Figura 1 - Equação do balanço de massa .....	14
Figura 2 - Fluxograma da ETEI em estudo .....	17
Figura 3 - Tanques de Neutralizadores da ETEI, localizado em Barcarena-Pa. .....	20
Figura 4 - Clarificador da ETEI, localizado em Barcarena-Pa. ....	21
Figura 5 - Clarificadores da ETEI selecionados para pesquisa, localizados em Barcarena-Pa. ....	23
Figura 6 - Esquemático representativo do desenho amostral .....	25
Figura 7 - Registro fotográfico das coletas realizadas no período 04 a 05/01/2024. .....	27
Figura 8 - Registro fotográfico dos ensaios no Laboratório LAESA da UFPA. ....	29
Figura 9 - Relação entre a Taxa de remoção de sólidos pela Taxa de Aplicação Hidráulica. ....	34
Figura 10 - Representação gráfica da caracterização dos SS em termos de SSF e SSV. ....	38
Figura 11 - Representação gráfica da caracterização das parcelas de ST em termos de STF e STV. ....	39
Figura 12 - Representação gráfica do resultado do Balanço de Massa. ....	41
Figura 13 - Balanço de massa da Carga de ST observados nos decantadores 82C e 82E. ....	44
Figura 14 - Avaliação gráfica da aderência das taxas de aplicação hidráulica dos decantadores às referências normativas e bibliográfica. ....	46
Figura 15 - Avaliação gráfica da aderência das taxas de aplicação hidráulica dos decantadores às referências aos dados de projeto. ....	47
Figura 16 - Apresenta a comparação das TAS para SST. ....	48





## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de sedimentação .....	13
Tabela 2 - Informações qualitativas do sistema de forma individualizada .....	18
Tabela 3 - Informações quantitativas da geração de lodo da ETEI em m <sup>3</sup> /dia (média observada no período de 2021 a 2023).....	19
Tabela 4 - Comparação entre as vazões alimentação observadas e as vazões de projeto .....	23
Tabela 5 -Parâmetros de definição de carga por Clarificador .....	24
Tabela 6 - Vazões adotadas na realização do Balanço de massa (m <sup>3</sup> /dia).....	30
Tabela 7 - Resultados Analíticos analisados no LAESA para ST (g/m <sup>3</sup> ). .....	31
Tabela 8 - Apresenta os resultados das cargas de ST em Kg/dia.....	32
Tabela 9 - Apresenta as concentrações dos ST e dos SST, sendo este último caracterizados em parcelas fixas e voláteis. ....	37
Tabela 10 - Apresenta as concentrações dos ST, sendo caracterizados em parcelas fixas e voláteis. ....	39
Tabela 11 - Resumo do Balanço de massa nos decantadores. ....	40
Tabela 12 - Taxas de Aplicação Hidráulica observadas nos Decantadores.....	45
Tabela 13 - Taxas de Aplicação de sólidos suspensos observados nos Decantadores C/E. ....	48



# Sumário

1.	APRESENTAÇÃO.....	9
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1	GERAL.....	11
2.2	ESPECÍFICOS.....	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DA SEDIMENTAÇÃO.....	12
3.2	BALANÇO DE MASSA.....	14
3.3	SUBPRODUTOS SÓLIDOS DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE.....	15
3.4	PROCESSOS DE TRATAMENTO DO LODO.....	16
4.	METODOLOGIA.....	17
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
4.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICA DAS UNIDADES DE TRATAMENTO.....	19
4.3	DESENHO AMOSTRAL.....	22
4.4	PONTOS DE AMOSTRAGENS.....	24
4.5	PROCEDIMENTO ANALÍTICO.....	28
4.6	BALANÇO DE MASSA.....	29
4.7	TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA.....	32
4.8	TAXA DE APLICAÇÃO DE SÓLIDOS.....	35
5.	RESULTADOS.....	37
5.1	RESULTADOS DA ANÁLISE DE SÓLIDOS.....	37
5.2	BALANÇO DE MASSA.....	40
5.3	AVALIAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA.....	45
5.4	AVALIAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO DE SÓLIDOS.....	47
6.	CONCLUSÕES.....	50
7.	REFERÊNCIAS.....	53



## 1. APRESENTAÇÃO

A área de estudo trata-se de um sistema de tratamento físico-químico, o qual é constituído por tanque de acúmulo, estação de bombeamento bruto, unidade mecanizada de mistura rápida, unidade de mistura lenta e unidade de decantação, e canal de lançamento do efluente tratado. Localizada no município de Barcarena, onde o processo de clarificação do efluente ocorre em um tanque composto de sistema de raspadores (decantadores) onde é feita a coagulação e a floculação para promover a precipitação do material sólido em suspensão, em seguida ao decantador do tipo circular, retirada dos sólidos contidos nos efluentes provenientes dos neutralizadores e o lançamento do efluente tratado em corpo hídrico.

O sistema de tratamento possui capacidade máxima de até 14.000 m<sup>3</sup>/h, onde para a estimativa da vazão de lodo gerado foi considerado o sistema de bombeamento até o depósito de rejeitos, onde se observou uma vazão média geral das saídas dos decantadores de 503 m<sup>3</sup>/h com base nos dados históricos monitorados, com uma composição estimada de 95% de água e 5% de sólidos. Para apresentar uma dimensão do volume de lodo gerado, através de uma analogia entre o volume de lodo produzido pelo sistema de 12.063 m<sup>3</sup>/dia com o volume do caminhão hidrovácuo com capacidade de 25 m<sup>3</sup>, seriam necessário a quantidade de 483 caminhões hidrovácuo por dia para realizar o esgotamento do lodo.

Todo lodo gerado é direcionado para as bacias de controles como forma de desaguamento da parte sólido por decantação natural, sendo estas bacias destinadas ao gerenciamento do manejo de águas pluviais. No entanto, a alternativa adotada reduz a disponibilidade volumétricas das bacias de controles, impactando negativamente nos controles de trânsito de cheias, bem como demandas excessivas de desassoreamento dessas bacias.

Existem diferenças nas características do efluente gerado no processo da Refinaria quando comparado com as drenagens pluviais das áreas dos depósitos de rejeitos em termos de concentração de sólidos, que



consequentemente afetam o ponto ótimo das concentrações de floculante na etapa de clarificação.

Observa-se alterações pontuais no aspecto visual da cor ótima na saída do tratamento, que acarretam em operações corretivas para normalizar o processo, tendo como indicadores operacionais fatores como pH e vazão de entrada para avaliar distúrbios no processo de tratamento.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Objetivando Conhecer os aspectos físicos através da caracterização em termos de sólidos presentes na fase líquida do efluente bruto, do efluente tratado e do lodo da fase sólida gerado na ETEI de uma Refinaria, bem como a avaliação da TAH e da TAS dos decantadores circulares principais parâmetros de projetos responsáveis pela boa performance do sistema de tratamento.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- a) Realizar a caracterização física do efluente bruto, do efluente tratado em termo de sólidos suspenso das linhas de tratamento 82C e 82D, objetivando avaliar os percentuais de sólidos voláteis e fixos que compõem a fase líquida, bem como avaliar a eficiência de remoção dos sólidos nos decantadores.
- b) Realizar a caracterização do lodo em termo de sólidos totais das linhas de tratamento 82C e 82D, objetivando avaliar os percentuais de sólidos voláteis e fixos que compõem a fase sólida.
- c) Apresentar o balanço de massa para avaliar as condições operacionais atuais da ETEI, sob o ponto de vista da performance.
- d) Avaliar a taxa de aplicação hidráulica dos decantadores das linhas de tratamento 82C e 82D, conforme critérios recomendados na NBR 12.209/2011 e referências bibliográficas.
- e) Avaliar a taxa de carregamento de sólidos nos decantadores das linhas de tratamento 82C e 82D, conforme critérios recomendados na NBR 12.209/2011 e referências bibliográficas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é uma operação física de separação de partículas sólidas com densidade superior à do líquido circundante. Em tanque em que a velocidade de fluxo de água é bem baixa, as partículas tendem a ir para o fundo sob a influência da gravidade. O líquido sobrenadante torna-se em consequência clarificado, enquanto as partículas no fundo formam uma camada de lodo, e são removidas conjuntamente com ele. A sedimentação é uma operação unitária de grande importância em diversos sistemas de tratamento de águas residuárias (Von Sperling, 1996).

Dentre as principais aplicações da sedimentação no tratamento de esgoto temos tratamento preliminar (remoção de areia); tratamento primário (remoção dos sólidos em suspensão); tratamento de secundário (remoção de sólidos biológicos); tratamento de lodo (adensamento do teor de sólidos) e tratamento físico-químico (remoção dos sólidos por precipitação química).

De acordo com a NBR 12.209/2011 em seu item 3 que trata sobre termos e definições, mas especificamente no subitem 3.52 descreve que tratamento primário é um conjunto de operação e processos unitários que visam, principalmente, à remoção de sólidos em suspensão, ainda que parcialmente, normalmente com eficiência de remoção de SS de cerca de 50%, e de DBO de cerca de 25%, podendo esses percentuais se elevarem até 80% e 50%, respectivamente, no caso do tratamento primário quimicamente assistido.

Alinhado a definição da NBR 12.209/2011, destaca-se que os dois tipos de decantadores primários mais adotados no controle ambiental de águas residuárias são o retangular de fluxo horizontal e decantador circular de alimentação central.

Diante disso, o processo de decantação é considerado uma etapa relevante, porque o efluente apresenta grandes concentrações de sólidos, sendo grande parte desses sólidos em forma de voláteis (carga orgânica), na forma de particulado. Portanto, o objetivo da sedimentação é produzir um efluente clarificado, ou seja, com baixas concentrações de sólidos.

Diante da apresentação dos princípios básicos, das aplicações e da definição da decantação primária os tipos de sedimentação descritos na **Tabela 1**.

**Tabela 1 - Tipos de sedimentação**

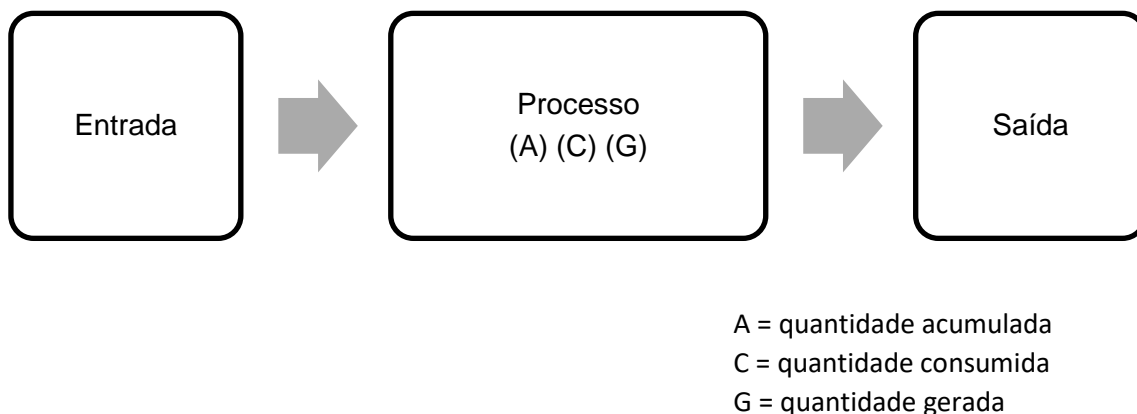
<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplo de aplicação</b>
Discreta	As partículas sedimentam-se, mantendo a sua identidade, ou seja, não se aglutinam. Desta forma, são conservadas as suas propriedades físicas, como, tamanho e densidade.	Caixa de areia
Floculenta	As partículas aglomeram-se a medida em que sedimentam. As características são alteradas, com o aumento do tamanho (formação de flocos) e, em decorrência, da velocidade de sedimentação.	Decantadores primários. Flocos químicos no tratamento físico-químico.
Zonal	Observa-se uma nítida interface de separação entre a fase sólida e fase líquida, e o nível da interface se move para baixo como resultado da sedimentação da manta de lodo.	Decantadores secundários
Compressão	Caso a concentração de sólidos seja ainda mais elevada, a sedimentação pode ocorrer apenas por compressão da estrutura das partículas. A compressão ocorre devido ao peso das partículas, com a compressão, parte da água é removida da matriz do floco, reduzindo o seu volume.	Fundo de decantadores secundários. Adensamento por gravidade.

Fonte: adaptado do Von Sperling, 1996.

## 3.2 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa é uma ferramenta que se baseando na Lei de Conservação de Massa de Antoine Lavoisier, que descreve que a massa não pode ser criada e nem destruída. Nesse sentido, a massa inicial tem que ser igual a massa final, a menos que haja um acúmulo no interior do equipamento (AQUIM, 2004).

A equação base para realizar um balanço de massa equivale ao Acúmulo = Entrada – Saída + Gerada – Consumida (**Figura 1**). Assim, conseguimos encontrar informações sobre o processo, como concentração de compostos, vazão, entre outros (AQUIM, 2004).



**Figura 1 - Equação do balanço de massa**

Desta forma, o balanço de massa será suma importância para obtenção da performance de remoção de sólidos na ETEI no caso em estudo, sendo esta adotada na metodologia de estudo com objetivo de avaliar eficiência de remoção dos sólidos presente no efluente, representada na característica em termo de teor de sólidos presente no lodo.





### 3.3 SUBPRODUTOS SÓLIDOS DE SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTE

As estações convencionais de tratamento de esgoto utilizam processos mecânicos e biológicos para realizar o tratamento. O processo de lodo ativado é o mais utilizado para tratamento biológico de águas residuais no mundo, mas resulta em uma geração considerável de lodo excedente a ser descartado. Este lodo contém altas frações de sólidos voláteis (VS) e retém grandes quantidades de água (>95% em peso), resultando em volumes extremamente grandes de sólidos residuais produzidos e custos de descarte significativos. Na verdade, o tratamento e a eliminação do excesso de lamas provenientes de estações de tratamento de águas residuais representam entre 25 a 65% do custo total de operação de uma planta. Assim, o método convencional converte o problema da poluição da água em o problema de eliminação de resíduos sólidos. (Pérez-Elvira, Sara I , and Maria P. D. J. de Oliveira. Sludge Management, IWA Publishing, 2020)

A geração de subprodutos sólidos nos sistemas de tratamento de esgotos de maneira geral acarreta a emissão de material gradeado, areia, espuma lodo primário, lodo secundário e lodo químico (para tratamento físico-químico). Sobre a produção de lodo existem diversos tipos de característica que variam de acordo com a tecnologia de tratamento, por exemplo, lodo primário são subproduto de decantadores; lodo biológico ou lodo secundário são subproduto de reatores aeróbios com biofilmes e lodo químico são subproduto de decantadores primário com precipitação química.

A NBR 12.209/2011 em seu item 3.20 descreve que lodo é a suspensão aquosa de componentes minerais e orgânicos separados no sistema de tratamento.

As características do lodo sob ponto de vista técnico, a propriedade mais importante é o teor de água. De acordo com Sperling (2001) “ainda que o lodo possa na maior parte das etapas do seu manuseio ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida [...]”.

E Calvacanti (2009) descreve que “lodos são suspensões aquosas de sólidos de caracterização orgânica e inorgânicas formadas em decorrência do tratamento físico, físico-químico e biológico de águas residuárias [...]”.

Desta forma, o subproduto sólido em estudo é proveniente de uma estação de tratamento de efluente industrial é descrito como lodo químico, que usualmente é resultante da precipitação química com sais metálicos ou com sal, onde no período de 2021 a 2023 observou-se uma vazão média de saída dos decantadores 82C e 82D de 153 m<sup>3</sup>/h e 98 m<sup>3</sup>/h, respectivamente, com uma composição estimada de 95% de água e 5% de sólidos.

### 3.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO DO LODO

A NBR 12.209/2011 que apresenta condições para elaboração de projeto hidráulico e de processo de Estação de tratamento de esgoto sanitário contemplando as etapas necessárias para o tratamento, contemplando o tratamento do lodo, subproduto do processo, o que muitas das vezes são negligenciados ou cuidado de formar ineficaz, causando assim problemas ambientais e dispêndios financeiros.

De acordo com Santos (2019) a caracterização dos subprodutos sólidos em ETE pode ser entendida como a primeira etapa da definição da rota tecnológica a ser utilizada para o manejo desses subprodutos.

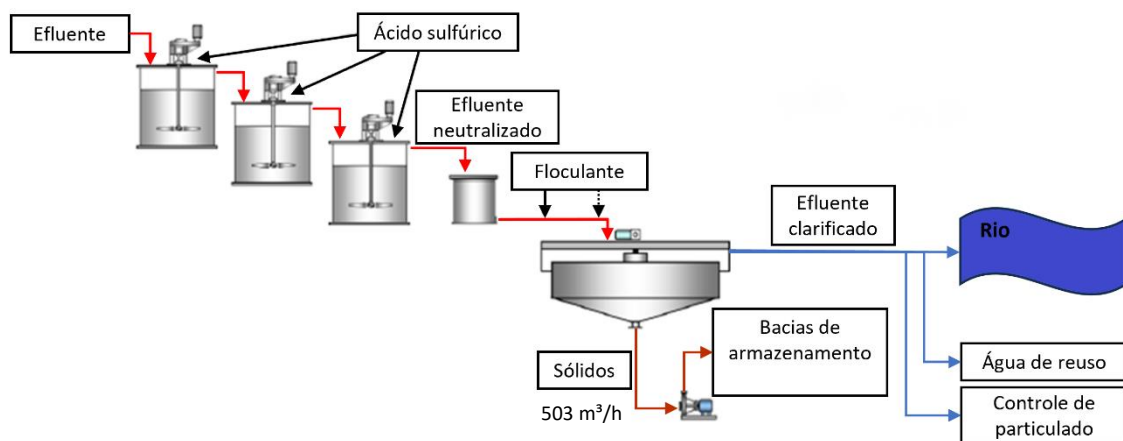
Considerando as tecnologias de tratamento do lodo como estabilização por processo biológico que adota bactérias para neutralizar a fração biodegradável; por processo químico mediante a oxidação da matéria orgânica e por processo térmico a partir da ação do calor sobre a fração volátil.

Além disso, a remoção da umidade de lodos é uma operação unitária e fundamental para redução de massa e de volume do lodo gerado nos processos de tratamento, onde uma das principais razões para se realizar a remoção do excesso de água é a melhoria nas condições de manejo do lodo, já que o lodo desaguado é mais facilmente transportado. Sabe-se que os principais processos utilizados para o desaguamento/adensamento são: leitos de secagem, lagos de lodos, centrífugas, filtros como prensa e a vácuo.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo trata-se de uma Estação de Tratamento de Efluentes Industriais (ETEI) de uma Refinaria localizada no Município de Barcarena, que tem o recebimento dos efluentes por tubulações que drenam as bacias de controle projetadas para armazenamento das águas pluviais incidentes na área dos depósitos de rejeitos e dos circuitos de drenagem da planta industrial. Devido à sua característica cáustica, inicialmente o efluente bruto passa por três estágios de neutralização para controle de pH em solução ácida. O processo de clarificação do efluente ocorre em um tanque composto de sistema de raspadores (Decantadores) onde é feita a coagulação com cloreto de amina e a floculação com polímeros para promover a precipitação do material sólido em suspensão, em seguida ao decantador do tipo circular, retirada dos sólidos contidos nos efluentes provenientes dos neutralizadores e o lançamento do efluente tratado em corpo hídrico, conforme ilustrado na **Figura 2**.



**Figura 2 - Fluxograma da ETEI em estudo**

O sistema de tratamento da empresa possui capacidade máxima de até 14.000 m<sup>3</sup>/h, conforme demonstrado na **Tabela 2**. Para a estimativa da vazão de lodo gerado foi considerado o sistema de bombeamento até o depósito de rejeitos, onde observou-se uma vazão média de saída dos decantadores de 503 m<sup>3</sup>/h, conforme demonstrado na **Tabela 3**. Com uma composição estimada de 95% de água e 5% de sólidos.

**Tabela 2 - Informações qualitativas do sistema de forma individualizada**

<i>ETEI</i>	<i>Neutralizadores</i>	<i>Decantadores</i>	<i>Capacidade Nominal</i>
82C	6 tanques de neutralização (2 linhas)	T-82C-05	3.600 m <sup>3</sup> /h
82D	3 tanques de neutralização (1 linha)	T-82D-05	2.800 m <sup>3</sup> /h
82E	6 tanques de neutralização (2 linhas)	T-82E-05	3.100 m <sup>3</sup> /h
82F	9 tanques de neutralização (3 linhas)	T-82F-05	4.500 m <sup>3</sup> /h

A ETEI é composta por quatro expansões recebendo efluente industrial e pluvial para tratamento de forma dinâmica adotando o seguinte fluxo de transferência como padrão operacional, conforme detalhamento abaixo:

- 82C – destina-se a receber o fluxo de transferência de efluente industrial das bacias de controle da Refinaria.
- 82D/82E/82F - destina-se a receber o fluxo de transferência da drenagem pluvial das bacias de controle da Refinaria e das bacias de controle dos depósitos de rejeitos.

Para este relatório estudaremos os aspectos físicos através da caracterização em termos de sólidos presentes no efluente bruto, no efluente tratado e no lodo, assim como a avaliação da taxa de aplicação hidráulica e da taxa de carregamento de sólidos nos decantadores primários das linhas C e F, somente.

**Tabela 3 - Informações quantitativas da geração de lodo da ETEI em m<sup>3</sup>/dia (média observada no período de 2021 a 2023).**

Mês	Decantador 82C	Decantador 82E
Jan	4.490	2.535
Fev	4.094	2.282
Mar	4.322	2.568
Abr	4.868	1.555
Mai	4.704	1.825
Jun	3.546	2.256
Jul	2.732	2.053
Ago	2.777	2.402
Set	3.398	2.027
Out	2.396	3.191
Nov	2.218	2.211
Dez	4.531	3.183

As médias das vazões de lodo geradas nos decantadores 82C e 82E são de 3.673 m<sup>3</sup>/dia e 2.341 m<sup>3</sup>/dia, respectivamente. Sendo esse subproduto direcionando para as bacias de controles como forma de desaguamento da parte sólido por decantação natural. A manutenção das bacias ocorre anualmente, no período da estiagem, sendo os resíduos desassoreados destinados em depósitos de rejeitos.

## 4.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICA DAS UNIDADES DE TRATAMENTO

### a) Neutralização

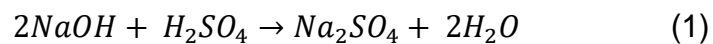
A primeira etapa para o tratamento do efluente é a neutralização, onde cada cadeia é composta por três tanques de neutralizadores, dispostos em série (**Figura 3**). Nestes tanques, é adicionado diretamente um ácido forte (ácido sulfúrico) para a correção do pH. A escolha de um ácido forte para realizar o ajuste do pH proporciona um melhor controle desse parâmetro, pois este tipo de ácido apresenta um grau de ionização alto ( $\alpha$

= 61 %), liberando uma quantidade significativa de íons de hidrogênio (H<sup>+</sup>). Esses íons reagem rapidamente com os íons de hidróxido (OH<sup>-</sup>) presentes na solução cáustica, resultando em uma neutralização mais rápida e bastante eficiente.



**Figura 3 - Tanques de Neutralizadores da ETEI, localizado em Barcarena-Pa.**

Considerando a presença de soda cáustica (NaOH) no efluente bruto, a reação de neutralização que ocorre no meio pode ser observada na equação (1), com a formação de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – sal neutro) e água como produtos.



As transferências entre os tanques de neutralização são realizadas através de extravasores, que direcionam o efluente via gravidade para o estágio seguinte. As cadeias de neutralizadores foram projetadas para correção do pH do efluente entre 5 e 9, para um tempo de retenção de aproximadamente 30 min.

A etapa de neutralização, além de ser importante para o enquadramento do pH na legislação vigente, é também importante para a etapa de clarificação, visto que para proporcionar uma melhor eficiência de clarificação é necessário que o efluente esteja na faixa específica de pH.

#### b) Clarificação

O efluente é enviado para os clarificadores (**Figura 4**), onde a finalidade desta unidade é reduzir o conteúdo de sólidos suspensos contidos no efluente. As partículas em suspensão e/ou coloides presente no efluente bruto são responsáveis pela elevação da turbidez característica, ou seja, os coloides possuem cargas superficiais que causam a repulsão entre si e, assim, torna-se necessária a coagulação com cloreto de amina e a floculação com polímeros para promover a precipitação do material sólido em suspensão, em seguida a decantação, retirada dos sólidos contidos nos efluentes e o lançamento do efluente tratado no corpo hídrico receptor.



**Figura 4 - Clarificador da ETEI, localizado em Barcarena-Pa.**



Os clarificadores empregados na ETEI são do tipo circular, e a alimentação é realizada no centro, por meio de calha e tubulação tangencial, dispondo também de extravasor periférico. Ainda na calha de alimentação do efluente, adiciona-se o floculante, de modo que a turbulência seja suficiente para que ocorra uma mistura adequada.

Na clarificação ocorrem em sequência os fenômenos de coagulação, floculação e decantação. A coagulação são processos químicos e físicos onde as partículas muito pequenas se agregam formando flocos que irão se decantar, e após a coagulação há uma mistura lenta da água, que serve para provocar a formação de flocos com as partículas. E por fim a decantação, esses flocos apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade, clarificando assim o meio líquido, ou seja, separando a fase líquida da sólida que tende a precipitar na forma de lodo. O material sólido decantado é removido do clarificador por meio de um sistema de raspadores e, posteriormente, é direcionado para as bacias de controles.

Após a etapa de clarificação é realizada, através da sala de controle da área, a adição de um antiespumante diretamente na linha de saída do efluente.

#### 4.3 DESENHO AMOSTRAL

De acordo com o Manual da CETESB (2011) o objetivo da amostragem e dos ensaios não é a obtenção de informações sobre alíquotas em si, geralmente constituídas de pequenas frações, mas a caracterização espacial e temporal do corpo d'água amostrado.

Considerando que o fluxo de transferência de efluente para os sistemas da ETEI varia de acordo com cenário climático, onde no período chuvoso é possível observar a operação das quatro linhas de tratamento 82C/D/E/F, e já no período



de estiagem fica mais evidente a operação reduzida do sistema, adotando-se um modelo padrão de fluxo de transferência considerando as linhas de tratamento 82C e 82E. Portanto, a variação sazonal influencia na vazão de efluente gerado.

O desenho amostral planejado (**Figura 5**) ocorreu nos dias 04 e 05 de janeiro de 2024 considerando as entradas (efluente bruto), saídas (efluente tratado), bem como a saída do lodo dos Clarificadores 82C e 82E. Apesar do mês de janeiro pertencer ao grupo do período chuvoso, não se observou chuvas intensas.

Diante disto, durante o período amostrado o modelo de fluxo de transferência praticado considerava as linhas de tratamento 82C e 82E, onde a linha C recebia efluente proveniente da Refinaria e linha E efluente oriundo da drenagem de chuva incidente no depósito de rejeitos, e ambas as vazões de contribuições se caracterizaram com baixa carga, conforme demonstrado na **Tabela 4**.

**Tabela 4 - Comparação entre as vazões alimentação observadas e as vazões de projeto**

ETEI	Carga	Vazão de Projeto	Vazões de alimentação observadas no momento da coleta	Data da coleta
		(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)	
82C	Alta	3.600	1.706	05/01/2024
	Baixa	1.800	1.459	04/01/2024
82E	Alta	3.100	1.496	05/01/2024
	Baixa	1.550	1.477	04/01/2024



**Figura 5 - Clarificadores da ETEI selecionados para pesquisa, localizados em Barcarena-Pa.**

As amostras foram coletadas na saída da válvula de descarga do decantador (**Figura 5**) em fracos adequados, conforme a NBR 9898 “Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores”. Em seguida, procede-se o seu transporte até o Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA). Cabe ressaltar que todo material de coleta será disponibilizado pelo Laboratório da UFPA.

#### 4.4 PONTOS DE AMOSTRAGENS

Para a caracterização física do lodo da ETEI foram realizadas amostragens para análise físicas de sólidos totais e suspensos, seguindo Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostra, CETESB/ANA (2011) e SMWW - Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 23rd (2017).

Os parâmetros por Clarificador para definição de carga alta e baixa, além do tempo de residência estão apresentados na **Tabela 5**. É importante destacar que o tempo de residência pode ser alterado caso ocorra uma modificação na vazão de alimentação do processo de tratamento.

**Tabela 5 -Parâmetros de definição de carga por Clarificador**

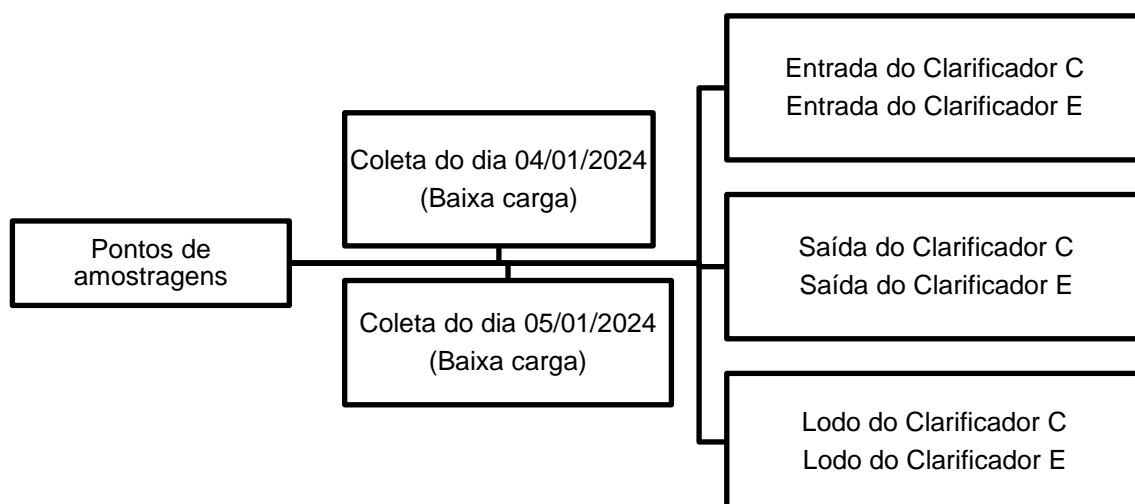
<i>ETEI</i>	<i>Carga</i>	<i>Vazão de alimentação</i> ( $m^3/h$ )	<i>Volume</i> ( $m^3$ )	<i>Tempo de</i> <i>residência</i> ( <i>h</i> )
82C	Alta	3600	3.700	1,00
	Baixa	1800		2,00
82E	Alta	3100	4.050	1,30
	Baixa	1550		2,60

As vazões de entrada observadas no dia 04 de janeiro para os Clarificadores com vazões de entrada de 1.459  $m^3/h$  e 1.477  $m^3/h$ , respectivamente. A respeito do fator contribuinte o efluente que alimentava a 82C, caracterizando a qualidade

do efluente era advindo da Refinaria, e para o clarificador 82E o efluente era advindo da Bacia de armazenamento do depósito de rejeito.

Já para no segundo dia de coleta 05 de janeiro as vazões de entrada observadas nos clarificadores da 82C como para 82E eram de 1.706 m<sup>3</sup>/h e 1.496 m<sup>3</sup>/h, respectivamente. A respeito do fator contribuinte o efluente que alimentava a 82C era proveniente da Refinaria, e para o clarificador 82E o efluente era proveniente da Bacia de armazenamento do depósito de rejeito.

Conclui-se que as condições operacionais observadas nos dois dias coletas tanto para o Clarificador 82C como 82E apresentavam carga operacional baixa, conforme parâmetro de projeto especificado na **Figura 6**.



**Figura 6 - Esquemático representativo do desenho amostral**

A seguir, apresenta-se os registros fotográficos, referentes as coletas de efluente bruto, tratado e do lodo referente aos clarificadores da 82C e 82E (**Figura 7**).



(a) Vista do Clarificador C



(b) Coleta na entrada do clarificador C



(c) Coleta na saída do clarificador C



(d) Coleta do lodo do Clarificador C



(e) Coleta na entrada do clarificador E



(f) Coleta na saída do clarificador E



(g) Coleta do lodo do clarificador E



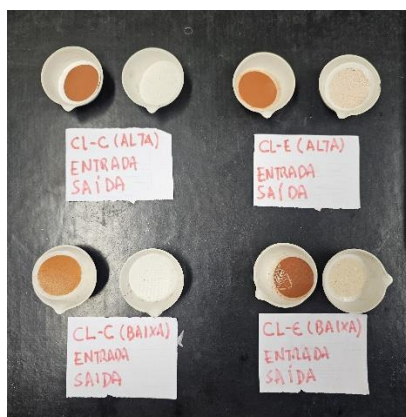
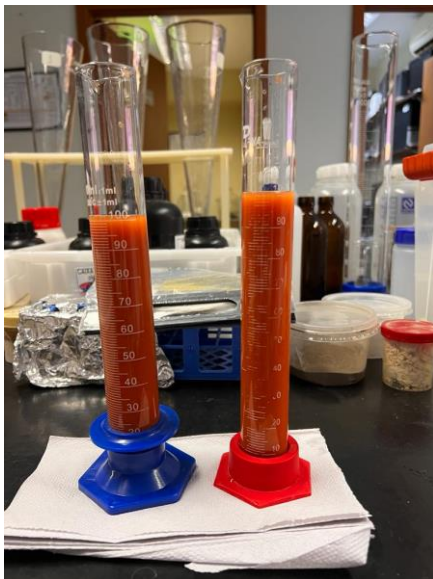
(h) Vista da chegada das amostras no Laboratório PPGESA

**Figura 7 - Registro fotográfico das coletas realizadas no período 04 a 05/01/2024.**

## 4.5 PROCEDIMENTO ANALÍTICO

Realizados de acordo com os procedimentos e padrões indicados pelo “Standard Methods For Examination of Water and Wastewater”, AWWA/APHA, 22<sup>a</sup> ed. (2017) em seus anexos 2540 C/D, sendo estas análises executadas no Laboratório de Instalações Piloto em Tratabilidade de Águas e Lodo do PPGESA/ITEC/UFPA que fica localizado no prédio do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LAESA) no Setor Profissional da Cidade Universitária José da Silveira Netto-UFPA (**Figura 8**).

Para a caracterização em termos de sólidos presentes no efluente bruto, no efluente tratado e no lodo gerado da ETEI estudada, foram realizada análise de sólidos totais e sólidos suspensos, bem como as parcelas voláteis e fixas presentes.



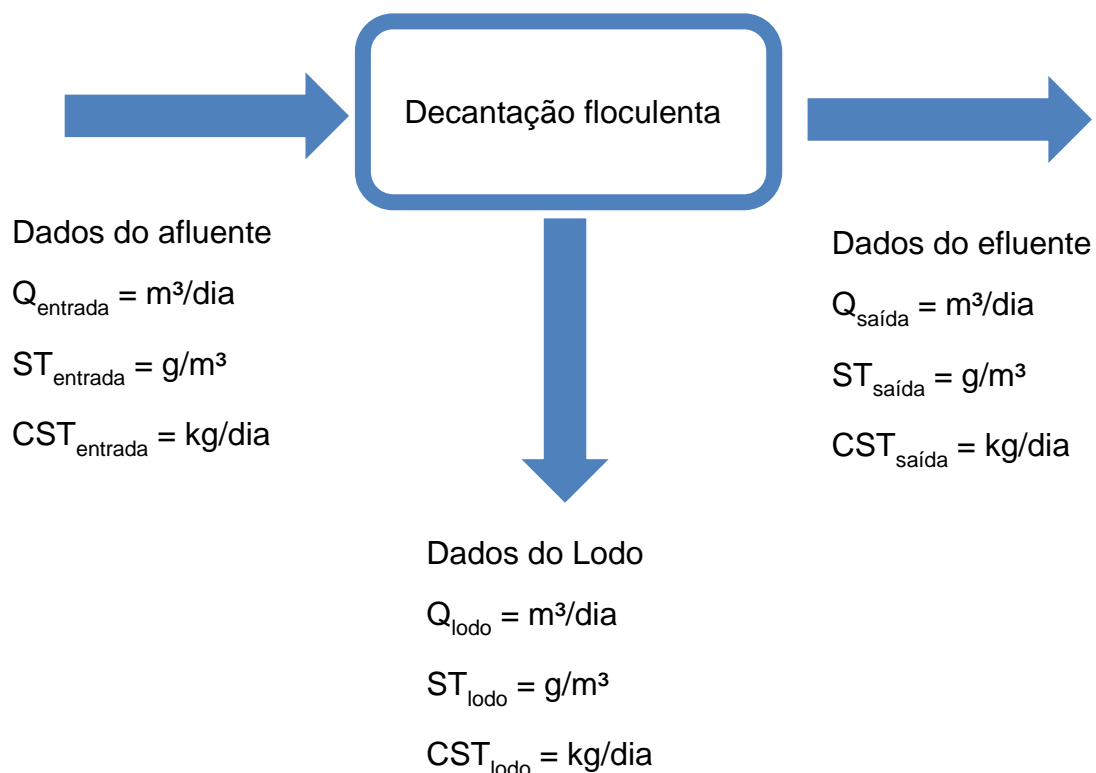
**Figura 8 - Registro fotográfico dos ensaios no Laboratório LAESA da UFPA.**

#### 4.6 BALANÇO DE MASSA

No balanço de massa analisaremos, em termos de sólidos totais, o quanto da carga de ST saiu no efluente tratado e no lodo, bem como os resultados das transformações de geração, consumo e acúmulo nos decantadores.

Desta forma, os componentes adotados para desenvolvimento do balanço de massa foram: vazões de entrada e saída da fase líquida e vazão de saída da fase sólida da ETEI (**Tabela 6**), somado aos resultados analíticos dos sólidos totais (**Tabela 7**) necessário para a caracterização da fase líquida (entrada e saída da ETEI) e da fase sólido (saída de lodo) em termo de sólidos totais das linhas de tratamento 82C e 82D.

Para esta fase da pesquisa foi adotado a equação (1) abaixo discriminada, com objetivo de avaliar a performance de remoção da carga de sólidos da ETEI.



$$\text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Geração} = \text{Acúmulo} \quad (1)$$

As variáveis adotadas para a realização do Balanço foram as seguintes:

#### I. Monitoramento das Vazões

As vazões foram obtidas no momento das amostragens, através de instrumentos de monitoramentos online, através de instrumento denominado de Flowmeter (Sistema medidor de vazão), que combina sistema de medição de fluxo e transmissor, enviando a informação do campo para o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Os instrumentos foram instalados nas tubulações de entrada e saída, sendo os dados monitorados em tempo real através do sistema gerenciador de informações Plant Information. Na **Tabela 6** a seguir são apresentados os dados de vazão em m<sup>3</sup>/dia.

**Tabela 6 - Vazões adotadas na realização do Balanço de massa (m<sup>3</sup>/dia)**

	Data da coleta de dados	
	04/01/2024	05/01/2024
<b>Decantadores</b>		
<b>Vazão de entrada do Decantador C</b>	35.016	40.944
<b>Vazão de saída do Decantador C</b>	31.608	35.928
<b>Vazão de lodo do Decantador C</b>	3.408	5.016
<b>Vazão de entrada do Decantador E</b>	35.448	35.904
<b>Vazão de saída do Decantador E</b>	31.848	32.304
<b>Vazão de lodo do Decantador E</b>	3.600	3.600

#### II. Monitoramento das Concentrações de Sólidos

Os procedimentos analíticos foram realizados no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará – LAESA, objetivando caracterização em termos de sólidos totais na fase líquida da entrada e saída da ETEI, e na fase sólida no lodo gerado da ETEI. Diante disso, foram realizada análise de sólidos totais e sólidos suspensos, bem como as parcelas voláteis e



fixas presentes. Na **Tabela 7** a seguir são apresentados os resultados analíticos em mg/L.

**Tabela 7 - Resultados Analíticos analisados no LAESA para ST (g/m<sup>3</sup>).**

Decantadores	Data da coleta de dados	
	04/01/2024	05/01/2024
Entrada do Decantador C	867	1.477
Saída do Decantador C	778	935
Lodo do Decantador C	3.842	3.536
Entrada do Decantador E	1.678	2.294
Saída do Decantador E	1.523	1.388
Lodo do Decantador E	7.112	3.600

### III. Carga de Sólidos totais

Para cálculo da carga de sólido da fase líquida na entrada e na saída da ETEI, e na fase sólida no lodo gerado da ETEI foi adotado a equação (2).

$$\text{Carga ST } \left( \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right) = \text{Vazão} \times \text{Concentração ST} \quad (2)$$

Onde,

Vazão (m<sup>3</sup>/dia) = vazões da fase líquida na entrada e na saída da ETEI, e na fase sólida vazão de lodo gerado da ETEI.

Concentração (g/m<sup>3</sup>) = resultado analítico de ST realizado na fase líquida na entrada e na saída da ETEI, e na fase sólida no lodo gerado da ETEI foi adotado a equação.

Na **Tabela 8** a seguir são apresentados os resultados das Cargas de ST em Kg/dia.

**Tabela 8 - Apresenta os resultados das cargas de ST em Kg/dia.**

	Data da coleta de dados	
	04/01/2024	05/01/2024
<b>Decantadores</b>		
<b>Entrada do Decantador C</b>	30.359	40.944
<b>Saída do Decantador C</b>	24.591	35.928
<b>Lodo do Decantador C</b>	13.094	33.593
<b>Entrada do Decantador E</b>	35.448	35.904
<b>Saída do Decantador E</b>	31.848	32.304
<b>Lodo do Decantador E</b>	25.603	53.453

#### 4.7 TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA

A NBR 12.209/2011 no item 3.42 descreve que a taxa de aplicação hidráulica ou superficial é a relação entre a vazão do afluente a uma unidade de tratamento e a área horizontal na qual essa vazão é distribuída, expressa em metros quadrados por metro cúbico por dia ( $m^3/m^2 \cdot dia$ ).

A TAH corresponde ao quociente entre a vazão afluente à estação de tratamento e a área superficial dos decantadores. Nota-se que TAH é baseada apenas na vazão de afluente à estação, tal se deve ao fato de que apenas a vazão de afluente possui uma componente ascendente. A componente é importante, no sentido de que se a velocidade ascendente do líquido for superior à velocidade de sedimentação dos sólidos, estes não conseguirão ir para o fundo do decantador, saindo com o efluente final (Sperling, 1997).

Considerando a NBR 12.2016/1992 em seu item 5.10 que trata sobre dimensionamento de decantadores, unidades destinadas à remoção de partículas presentes na água. E sabendo que os princípios operacionais dimensionados para o tratamento de águas residuais, através de decantadores primários são em geral são os mesmos princípios, adotaremos a referida NBR 12.216/92 para avaliação da taxa de aplicação hidráulica nos decantadores através da fórmula (2).



$$\text{Taxa de aplicação hidráulica (m}^3/\text{m}^2\text{d)} = \frac{\text{Vazão do afluyente (}\frac{\text{m}^3}{\text{dia}}\text{)}}{\text{Área superficial (m}^2\text{)}} \quad (2)$$

Onde,

Vazão do afluyente = é vazão de entrada no decantador em m<sup>3</sup>/dia

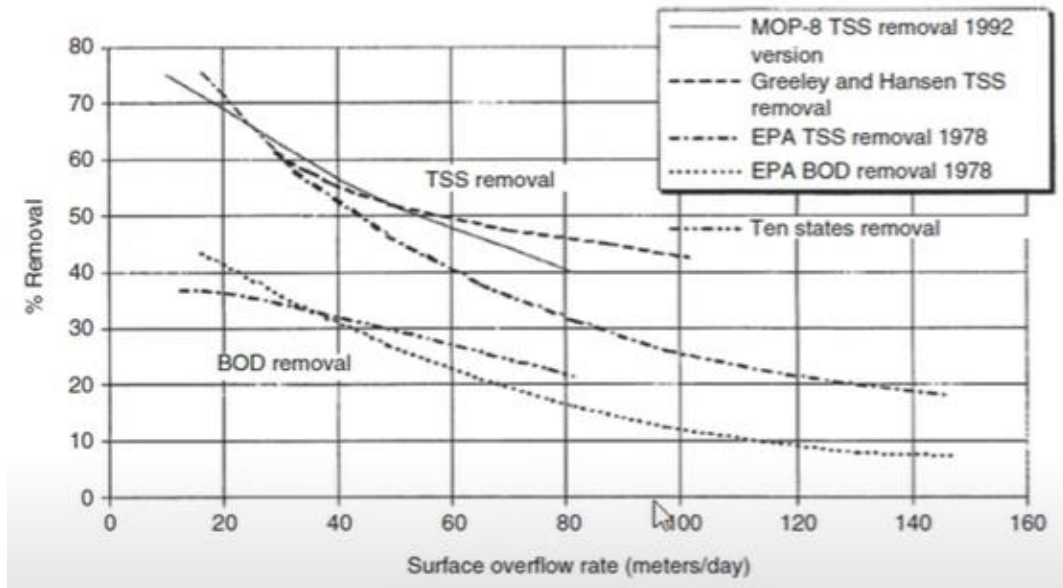
Área superficial = é área de contato do decantador circular

Sobre avaliar as taxas observadas comparando-as a valores de referência, bem como padrões observados nas literaturas, adota-se para análise das taxas calculadas neste Relatório as seguintes referências:

- 1) ITEM 6.3.2 NBR 12.209/2011: TAH  $\leq$  90 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d quando o processo for de decantação primária quimicamente assistida.
- 2) Metcalf & Eddy (1991): TAH  $\leq$  32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d a 48 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d para vazão média

A **Figura 9** apresenta referências clássicas que indicam uma relação entre a Taxa de aplicação Hidráulica pelo percentual de remoção de sólidos e DBO, resultante de diversas observações sobre o comportamento da remoção de sólidos presente no efluente em decantadores. Estes dados são resultados de observações e conhecimento de pesquisas e estudos ao longo do tempo, desta forma permitindo adotar resultados de taxas de aplicação hidráulica, onde não houver condição da realização de teste em laboratório.

Importa ressaltar, e o que é confirmado pela **Figura 9**, a taxa de captura de sólidos nos decantadores varia em função da taxa escoamento superficial, pois quanto menor for a taxa de aplicação hidráulica, maior será o percentual de remoção da carga de sólidos.



**Figura 9 - Relação entre a Taxa de remoção de sólidos pela Taxa de Aplicação Hidráulica.**

Fonte: Metcalf & Eddy (1991)

Nesse sentido, se faz necessário avaliar a aderência das taxas observados no período estudo relacionando-as com a TAH para os dados de projeto dos clarificadores, onde temos:

(a) Para o Clarificador C

Projeto	Carga Alta		Carga Baixa	
Q <sub>entrada</sub>	86.400	m <sup>3</sup> /dia	43.200	m <sup>3</sup> /dia
Área (Ø)	D=41 M	1.320,3 m <sup>2</sup>		
<b>TAH</b>	<b>65,44</b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia</b>	<b>32,72</b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia</b>

(a) Para o Clarificador E

Projeto	Carga Alta		Carga Baixa	
Q <sub>e</sub>	74.400	m <sup>3</sup> /dia	37.200	m <sup>3</sup> /dia
Área (Ø)	D=34 M	907,9 m <sup>2</sup>		
<b>TAH</b>	<b>81,95</b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia</b>	<b>40,97</b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia</b>

#### 4.8 TAXA DE APLICAÇÃO DE SÓLIDOS

A NBR 12.209/2011 em seu item 3.44 descreve que a taxa de aplicação de sólidos é a relação entre a massa de sólidos em suspensão no afluente, introduzida numa unidade de tratamento e a área sobre a qual é aplicada, por unidade de tempo, expressa em kg SS/m<sup>2</sup>.dia.

A TAS corresponde ao quociente entre a carga de sólidos aplicada e a área superficial dos decantadores. O importante é que a carga de sólidos aplicada por unidade de área não seja superior ao fluxo limite de sólidos (Sperling, 1997).

A teoria do fluxo de sólidos descreve o fenômeno da sedimentação zonal que tem lugar nos decantadores e adensadores por gravidade. A sedimentação zonal é quando se tem uma elevada concentração de sólidos, estes tendem a formar um manto que sedimenta como uma massa única de partículas (as partículas tendem a permanecer numa posição fixa com relação às partículas vizinhas). Observa-se uma nítida interface de separação entre a fase sólida e a fase líquida, e o nível da interface se move para baixo como resultado da sedimentação da massa de lodo (Sperling, 1997).

Taxa de aplicação de sólidos (Kg ST/m<sup>2</sup>d)

$$= \left( \frac{\text{Vazão do afluente} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \times [\text{concentração ST} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right)]}{\text{Área superficial do decantador circular (m}^2\text{)}} \right)$$

Onde,

Vazão do afluente = é vazão de entrada no decantador em m<sup>3</sup>/dia

Concentração ST = é resultado medido em laboratório para sólidos totais presente no efluente de entrada.

Área superficial = é área de contato do decantador circular



Sobre avaliar as taxas observadas comparando-as a valores de referência, bem como padrões observados nas literaturas, adota-se para análise das taxas de aplicação de sólidos calculadas este Relatório as seguintes referências:

- 1) Metcalf & Eddy (1991):  $TAS \leq 96 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$  para vazão média.
- 2) ITEM 6.6.38.1.2 NBR 12.209/2011:  $TAH \leq 144 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$  para vazão máxima.

## 5. RESULTADOS

Para a caracterização em termos de sólidos presentes no efluente bruto, no efluente tratado e no lodo gerado da ETEI, foram realizadas as seguintes análises:

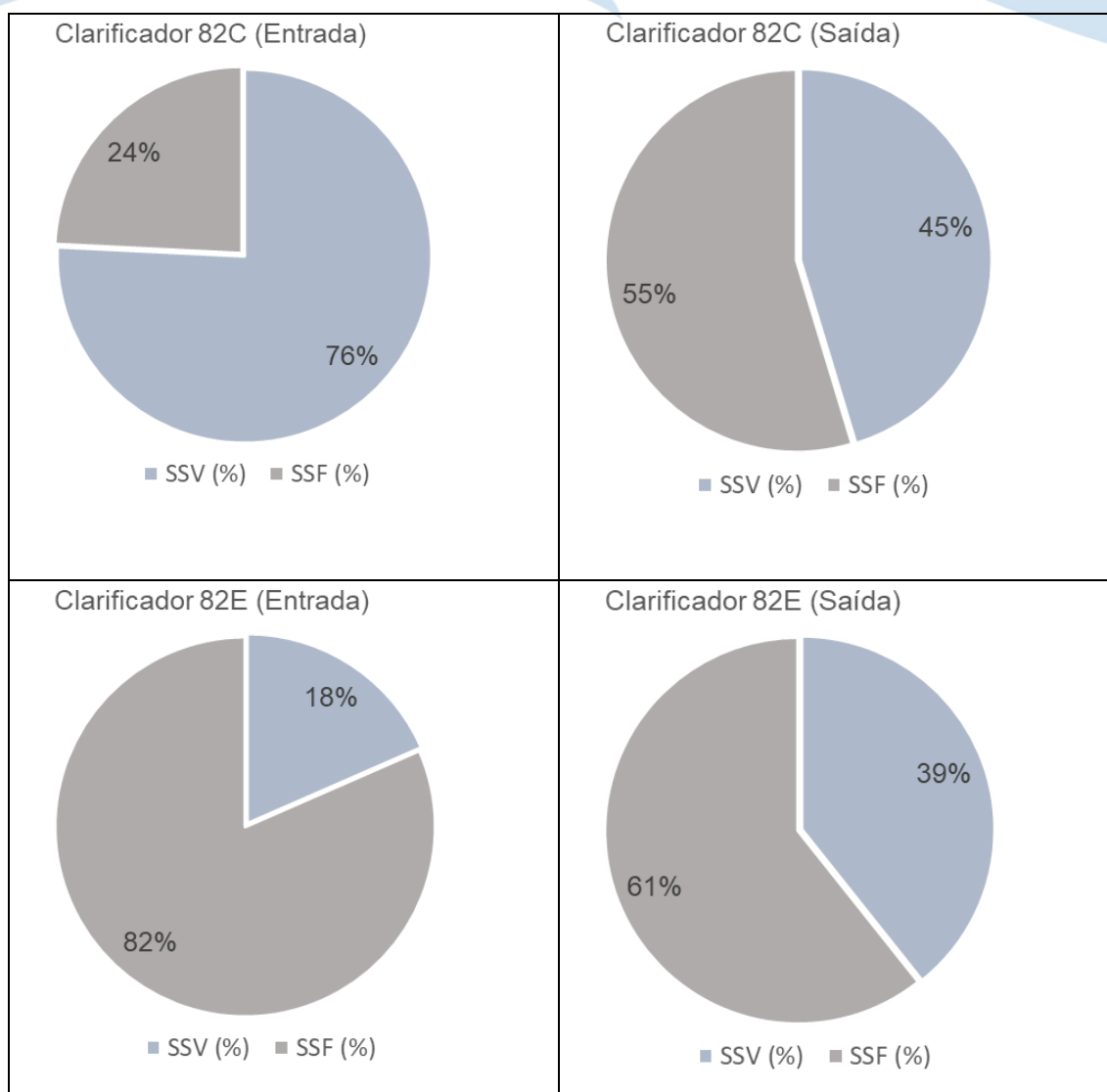
- a) Para fase líquida (entrada e saída): sólidos totais e sólidos suspensos caracterizando os percentuais de sólidos suspensos fixos e voláteis;
- b) Para fase sólida (Lodo): sólidos totais caracterizando os percentuais de sólidos suspensos fixos e voláteis

### 5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SÓLIDOS

#### 5.1.1 NA FASE LÍQUIDA

**Tabela 9 - Apresenta as concentrações dos ST e dos SST, sendo este último caracterizados em parcelas fixas e voláteis.**

		Clarificador 82C		Clarificador 82E	
		Entrada	Saída	Entrada	Saída
04/01/2024	ST (mg/L)	867	778	1.678	1.523
	SST (mg/L)	182	3,6	434	10,4
	SDT (mg/L)	685	774,4	1.244	1.512,6
	SSTV (mg/L)	41	2,5	312	6,7
	SSTF (mg/L)	141	1,1	122	3,7
	SSTV (%)	77,47	29,63	28,11	35,9
	SSTF (%)	22,53	70,37	71,89	64,1
05/01/2024	ST (mg/L)	1.477	935	2.294	1.388
	SST (mg/L)	166	7,87	502	11,87
	SDT (mg/L)	1.311	927,13	1.792	1.376
	SSTV (mg/L)	43	3,1	458	6,8
	SSTF (mg/L)	123	4,8	44	5,1
	SSTV (%)	74,1	61,02	8,76	42,7
	SSTF (%)	25,9	38,98	91,24	57,3



**Figura 10 - Representação gráfica da caracterização dos SS em termos de SSF e SSV.**

A representação gráfica expressa na **Figura 10** descreve a qualidade da fase líquida dos Decantadores 82C e 82E, classificando-as em parcelas composta em termos de SSF e SSV.

O efluente bruto que alimenta o Decantador 82C é proveniente do processo produtivo da Refinaria e apresenta característica cáustica com aspecto turvo moderado. Já o efluente bruto do Decantador 82E proveniente da drenagem das bacias de controle projetadas para armazenamento das águas pluviais incidentes na área dos depósitos de rejeitos tem como principal característica um aspecto turvo bem acentuado e de cor avermelhada.

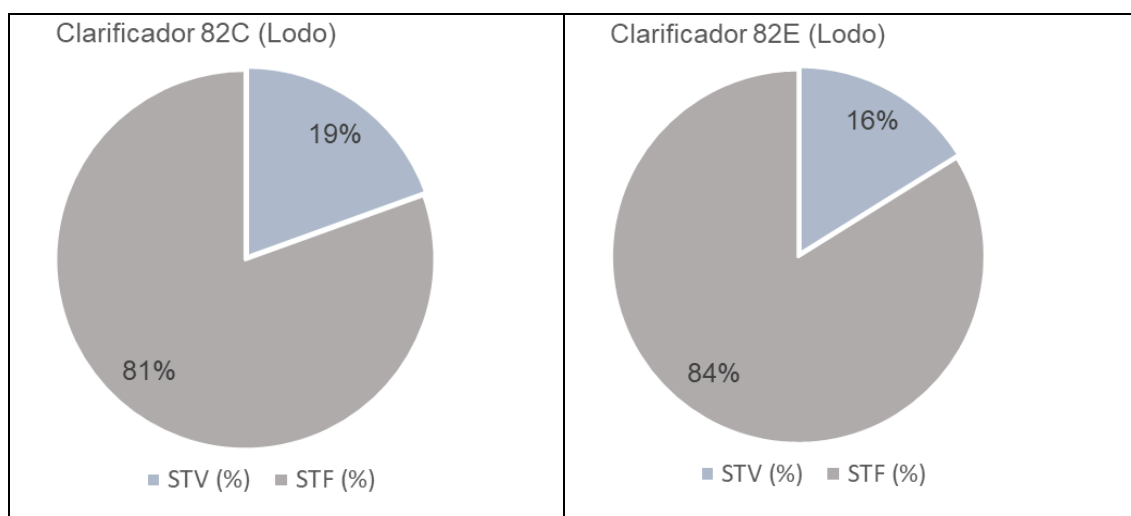


Desta forma, o maior percentual da parcela de SSF para o efluente e o afluente do Decantador 82E é devidamente justificado pela qualidade do efluente que apresenta maior concentração de sólidos, quando comparado a entrada e saída do Decantador 82C.

### 5.1.2 NA FASE SÓLIDA

**Tabela 10 - Apresenta as concentrações dos ST, sendo caracterizados em parcelas fixas e voláteis.**

		Clarificador 82C	Clarificador 82E
04/01/2024	<b>ST (mg/L)</b>	3.842	7.112
	<b>STV (mg/L)</b>	733	1.336
	<b>STF (mg/L)</b>	3.110	5.776
	<b>STV (%)</b>	0,19	0,19
	<b>STF (%)</b>	0,81	0,81
05/01/2024	<b>ST (mg/L)</b>	3.537	14.848
	<b>STV (mg/L)</b>	704	2.003
	<b>STF (mg/L)</b>	2.833	12.845
	<b>STV (%)</b>	0,20	0,13
	<b>STF (%)</b>	0,80	0,87



**Figura 11 - Representação gráfica da caracterização das parcelas de ST em termos de STF e STV.**

Da mesma forma que do item 5.1.1 tal como foi observado na fase líquida um maior percentual da parcela SSF, como consequente o lodo da fase sólida dos decantadores apresentaram uma classificação dos sólidos suspensos, com percentual superior a 80% em parcela de SSF, isto é, com características carga inorgânica.

## 5.2 BALANÇO DE MASSA

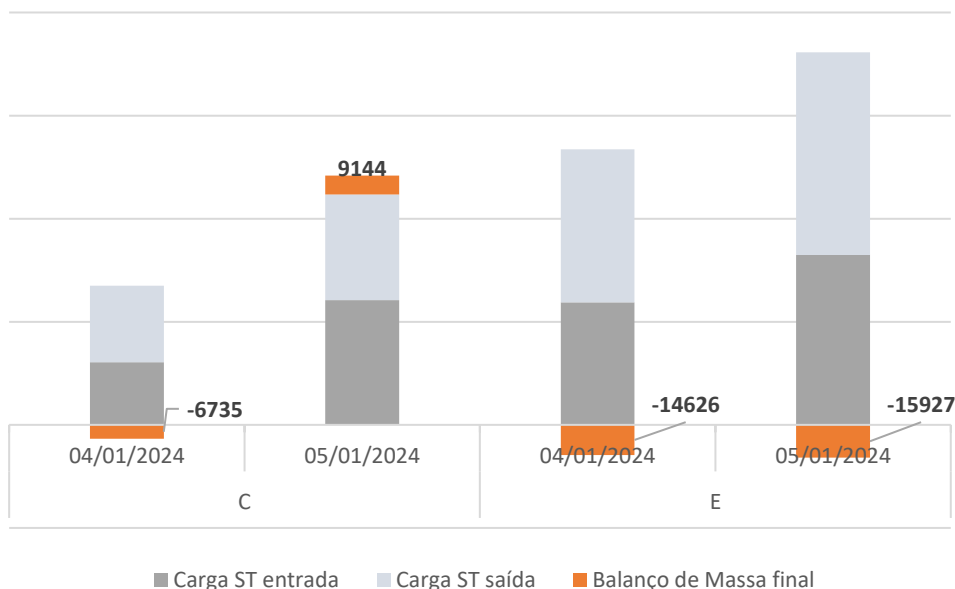
A **Figura 11** apresenta os resultados dos balanços de massa em termo de sólidos totais analisados no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Pará – LAESA.

Considerando o princípio do balanço em que a massa não pode ser criada e nem destruída, onde as transformações podem expressar-se em termos da geração, do consumo e do acúmulo de sólidos totais nos decantadores.

A **Tabela 11** e a **Figura 12** apresentam um resumo das observações ocorrida no processo de transformação do Balanço de Massa, do que entrou, do que saiu (efluente + lodo), e do que foi gerado ou consumido no interior do decantador, em termo de sólidos totais.

**Tabela 11 - Resumo do Balanço de massa nos decantadores.**

	Decantador 82C		Decantador 82E	
	04/01/2024	05/01/2024	04/01/2024	05/01/2024
<b>Carga ST</b> Entrada	30359	60474	59482	82364
<b>Carga ST</b> saída	37094	51330	74108	98291
<b>Balanço de Massa</b>	-6735	9144	-14626	-15927
Final				



**Figura 12 - Representação gráfica do resultado do Balanço de Massa.**

Observam-se no balanço de massa realizado os seguintes comportamentos:

- I. O Decantador 82C apresentou uma eficiência de remoção da carga de ST em torno de 19%. Enquanto o Decantador 82E apresentou uma eficiência de remoção na ordem de 45%, considerando as quatro observações;
- II. O Decantador 82C apresentou uma variação no processo de transformação ocorrida no interior do decantador, entre geração e acúmulo. Enquanto o Decantador 82E apresentou somente um processo de transformação sob a condição de geração de sólidos no seu interior;
- III. O Decantador 82E por apresentar maior taxa de eficiência na remoção dos sólidos presentes no efluente teve, como consequência na saída do lodo maior carga de sólidos removidos;
- IV. Em ambos Decantadores observa-se, na fase líquido do tratamento, um aumento da Carga de sólidos totais na saída do tratamento, a exceção ficou para o Decantador 82C em apenas um dia do período estudado.

Portanto, para este subitem observa-se uma Carga de sólidos totais que se apresentam no balanço de massa são maiores no Decantador 82E, justificado pela maior Taxa de aplicação de sólidos descrita no subitem 5.4. o inverso ocorre no Decantador 82C.



A origem dos afluentes que alimentam os Decantadores também exerce um fator importante considerando o fato do Decantador C, que no período do estudo recebia efluente drenado da Refinaria, já o Decantador E recebia drenagens das chuvas incidente nos depósitos de resíduos sólidos. Este último apresenta uma carga de sólidos mais expressiva que a Refinaria, corroborando com os achados do subitem 5.1.1 que apresenta como classificação dos sólidos suspensos, na fase líquida, um percentual superior 60% em parcela de sólidos suspensos fixos, isto é, carga inorgânica.

A geração de sólidos no interior dos decantadores se deve ao fato inerente ao processo que se refere a presença de soda cáustica (NaOH) no efluente bruto, alinhada a reação de neutralização que ocorre no meio pelo uso de ácido sulfúrico, formando o sulfato de sódio como subproduto do processo de tratamento, logo este acréscimo de sólidos é expresso em termos de sólidos dissolvidos.

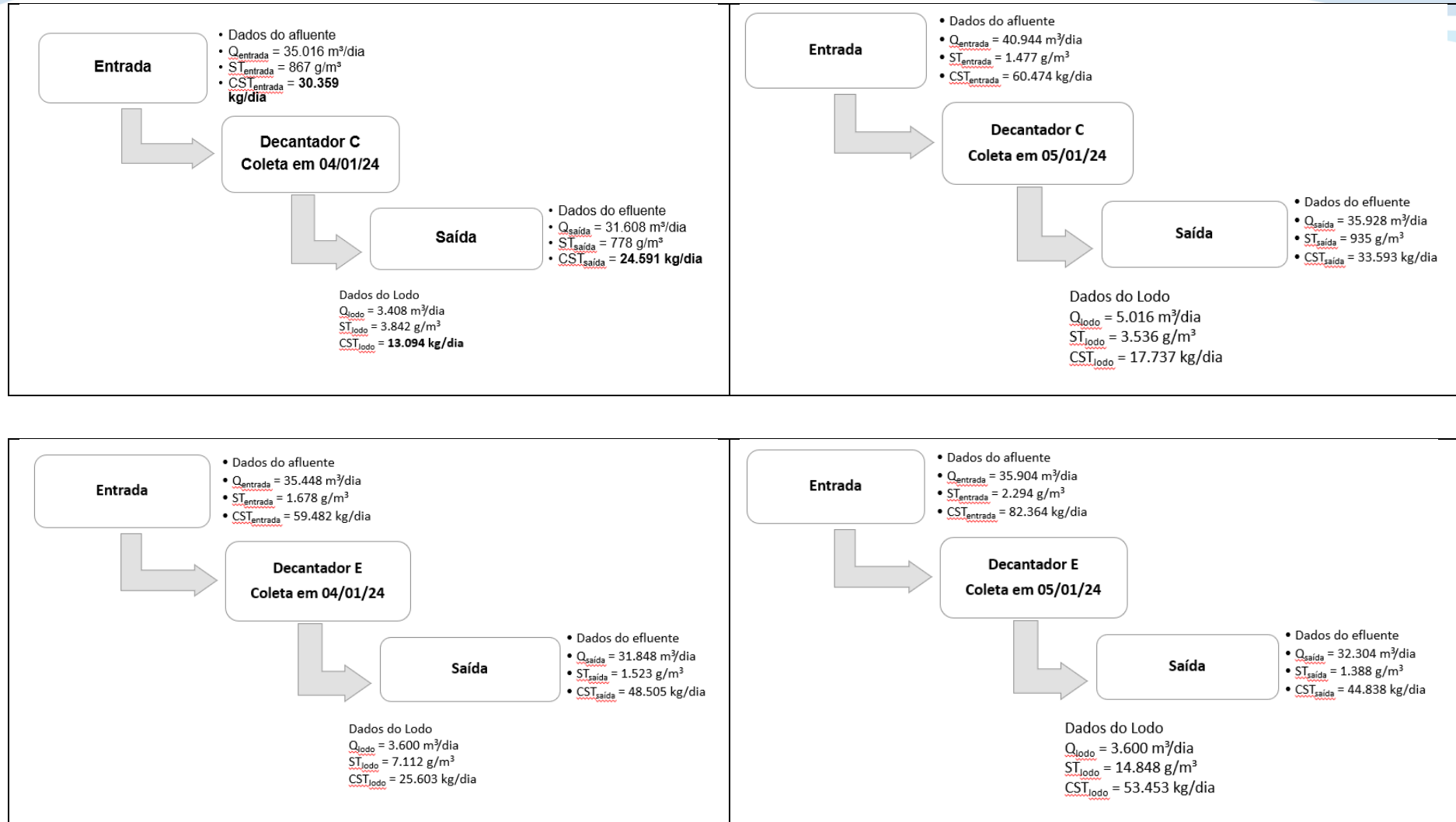


Figura 13 - Balanço de massa da Carga de ST observados nos decantadores 82C e 82E.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA

Perante o exposto no item 4.7, as taxas de aplicação hidráulica obtidos nos decantadores 82C e 82E para as variáveis obtidas no período de coleta estão apresentados na **Tabela 12**.

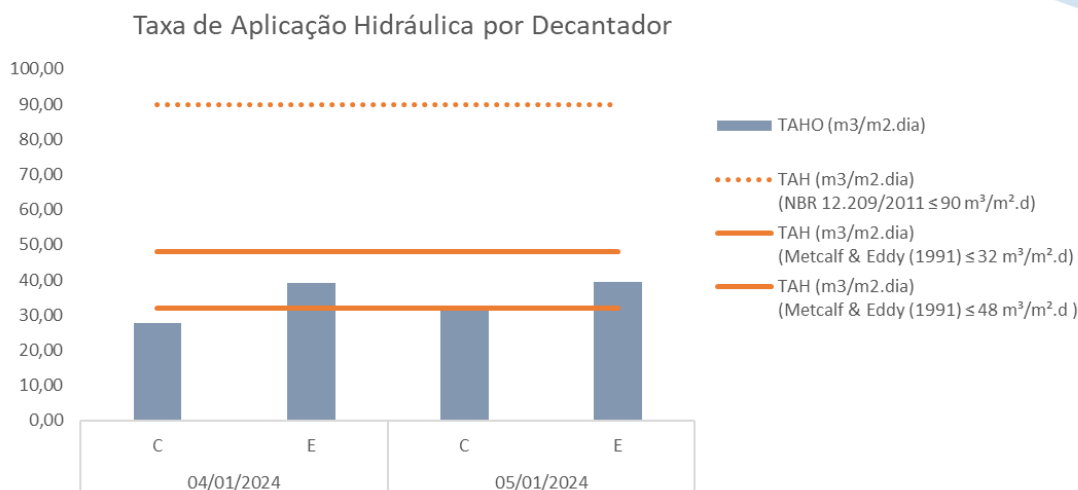
**Tabela 12 - Taxas de Aplicação Hidráulica observadas nos Decantadores.**

Data da coleta	04/01/24	04/01/24	05/01/24	05/01/24
Situação	Baixa carga	Baixa carga	Baixa carga	Baixa carga
Unidade	C	E	C	E
Qo (m <sup>3</sup> /dia)	35.016,00	35.448,00	40.944,00	35.904,00
Dc (m)	40,00	34,00	40,00	34,00
Ac (m <sup>2</sup> )	1.256,64	907,92	1.256,64	907,92
TAH <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)	27,86	39,04	32,58	39,55

Desta forma, e considerando os valores de referência, bem como padrões observados nas literaturas, adotou-se para análise das taxas calculadas este Relatório as seguintes referências:

- 1) ITEM 6.5.5.1.3 NBR 12.209/2011 =  $TAH \leq 24 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$
- 2) Metcalf & Eddy (1991) =  $32 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  a  $48 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  para vazão média
- 3) Dados de Projetos = Decantador C ( $32,72$  a  $65,44 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ) e Decantador E ( $40,97$  a  $81,95 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ )

Logo, a **Figura 14** apresenta a comparação das taxas de aplicação hidráulica calculada no período de estudo às referências da NBR 12.209/2011 e Metcalf & Eddy (1991).



**Figura 14 - Avaliação gráfica da aderência das taxas de aplicação hidráulica dos decantadores às referências normativas e bibliográfica.**

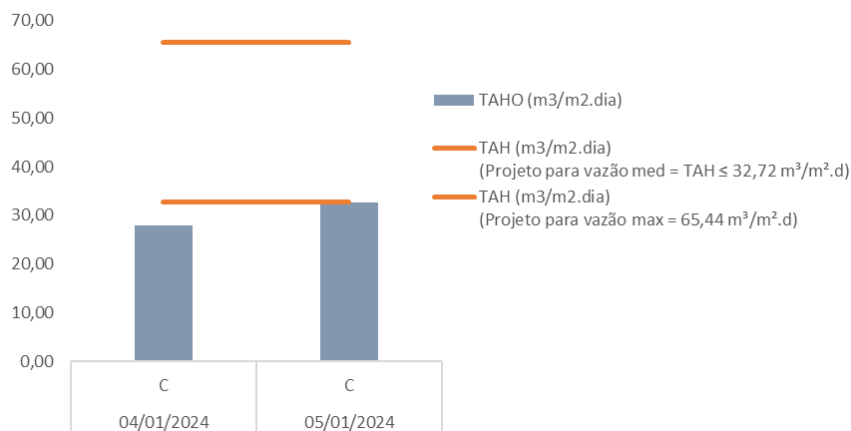
Desta forma, é possível observar na representação gráfica da **Figura 14** que ambos decantadores 82C e 82E apresentaram suas Taxas de aplicação hidráulica aderentes ao indicado pelo Metcalf & Eddy (1991), isto se deve ao fato de que o período estudado em ambas as amostras as vazões de entrada apresentaram um comportamento de carga baixa.

Nessa mesma lógica comparativa, agora com NBR 12.209/2011 ambos Decantadores apresentaram aderentes a referência.

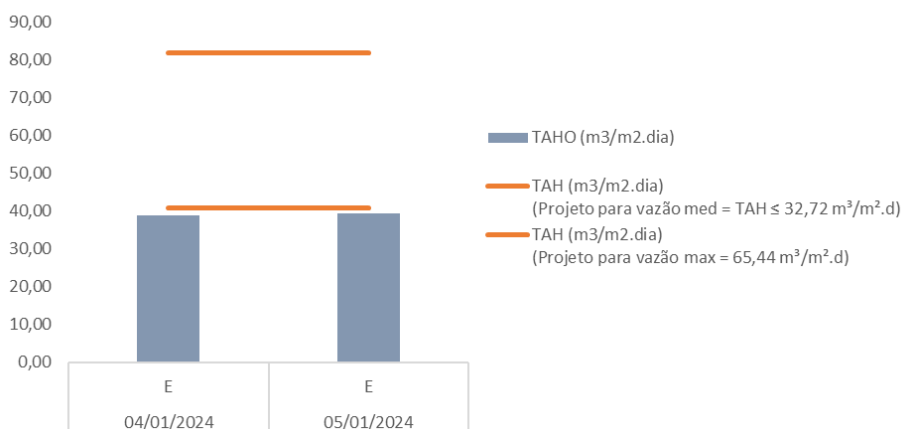
No entanto, as observações inaderentes não justificaram baixa performance de remoção de sólidos, principalmente os sólidos em suspensão, que alcançaram percentuais de eficiência acima de 90%. Fato este, devidamente subsidiado pela aderência as referências de projetos, conforme demonstrado pela **Figura 15** que apresenta a comparação entre as referidas taxas observadas com as calculadas com dados de projeto.

Outro ponto a ressaltar, trata-se da comparação das Taxas de aplicação hidráulica entre os Decantadores, onde observa-se que o 82E apresenta maiores taxas devido sua área superficial ter menores dimensões comparado a 82C.

Taxa de Aplicação Hidráulica no Decantador C x TAH de projeto



Taxa de Aplicação Hidráulica no Decantador E x TAH de projeto



**Figura 15 - Avaliação gráfica da aderência das taxas de aplicação hidráulica dos decantadores às referências aos dados de projeto.**

#### 5.4 AVALIAÇÃO DA TAXA DE APLICAÇÃO DE SÓLIDOS

Perante o exposto no item 4.8, as taxas de aplicação sólidos suspensos obtidos nos decantadores 82C e 82E para as variáveis obtidas no período de coleta estão apresentados na **Tabela 13**.



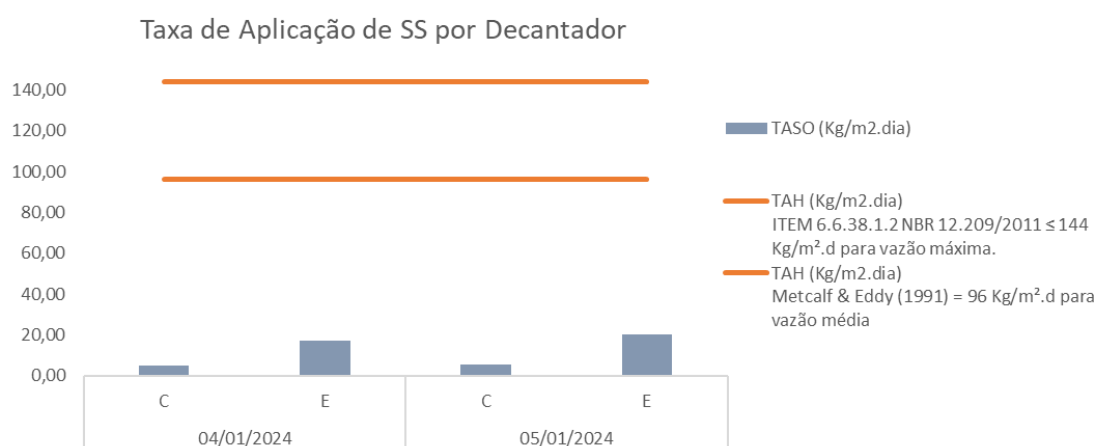
**Tabela 13 - Taxas de Aplicação de sólidos suspensos observados nos Decantadores C/E.**

Data da coleta	04/01/24		05/01/24	
Situação	Baixa carga	Baixa carga	Baixa carga	Baixa carga
Unidade	C	E	C	E
Qo (m <sup>3</sup> /dia)	35.016,00	35.448,00	40.944,00	35.904,00
Dc (m)	40,00	34,00	40,00	34,00
Ac (m <sup>2</sup> )	1.256,64	907,92	1.256,64	907,92
TAS <sub>o</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia)	5,07	16,94	5,41	19,94

Desta forma, e considerando os valores de referência, bem como padrões observados nas literaturas, adotou-se para análise das taxas calculadas este Relatório as seguintes referências:

- 1) Metcalf & Eddy (1991):  $TAS \leq 96 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$  para vazão média.
- 2) ITEM 6.6.38.1.2 NBR 12.209/2011:  $TAH \leq 144 \text{ Kg/m}^2.\text{d}$  para vazão máxima.

Logo, a **Figura 16** apresenta a comparação das taxas de aplicação para SST calculada no período de estudo.



**Figura 16 - Apresenta a comparação das TAS para SST.**



Desta forma, é possível observar na representação gráfica da **Figura 16** que ambos os decantador 82C e o 82E apresentaram suas Taxas de aplicação para SST inferior a referência do Metcalf & Eddy (1991), corroborando com a característica do efluente que apresenta qualidade mais inorgânica do que orgânica, conforme observado no item 5.1.1.

## 6. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos na Análise de sólidos concluem-se que a característica do efluente da entrada e saída, em termo de sólidos são:

- i. Sobre a representatividade da parcela dos sólidos suspensos nos sólidos totais o Decantador 82C apresenta-se com 15% no afluente e 1% no efluente de sólidos suspensos. Para o Decantador 82E apresenta-se com 24% no afluente e 1% no efluente de sólidos suspensos, logo a superioridade dos demais sólidos estão na forma dissolvida e ou sedimentáveis.
- ii. Para Decantador 82C: 76% dos sólidos suspensos apresentam-se na forma volátil contra 24% na forma fixa para o afluente. Considerando a eficiência de 97% de remoção dos sólidos suspensos totais na sedimentação, o efluente tratado apresentou uma parcela da forma fixa de 55% contra 45% na forma volátil.
- iii. Para Decantador 82E: 82% dos sólidos suspensos apresentam-se na forma fixa contra 18% na forma volátil para o afluente. Considerando a eficiência de 98% de remoção dos sólidos suspensos totais na sedimentação, o efluente tratado apresentou uma parcela da forma fixa de 61% contra 39% na forma volátil.

Desse modo, a concentração de sólidos totais é maior no Decantador 82E quando comparado ao Decantador 82C, isso é justificado pela maior taxa de aplicação de sólidos observada no aspecto turvo bem acentuada e de cor avermelhada do afluente do 82E, proveniente da drenagem das bacias de controle projetadas para armazenamento das águas pluviais incidentes na área dos depósitos de rejeitos. Nessa mesma lógica o decantador 82C recebe efluente drenado da Refinaria que apresenta característica cáustica com aspecto turvo moderado apresenta menor taxa de aplicação de sólidos.

Além disso, o resultado da análise de sólidos permitiu avaliar também a classificação das parcelas de sólidos fixos e voláteis presente na fase líquida dos decantadores apresentando uma classificação dos sólidos suspensos com percentual superior na parcela de sólidos suspensos fixos, isto é, indicando característica de carga inorgânica superior.

Da mesma forma, que foi observado na fase líquida um maior percentual da parcela sólidos suspensos fixo, como consequente o lodo da fase sólida dos decantadores apresentaram uma classificação dos sólidos suspensos, com percentual superior a 80% em parcela de sólidos suspensos fixos, isto é, com características carga inorgânica.

Sobre o balanço de massa realizado na fase líquida e sólida da ETEI obteve-se os seguintes comportamentos:

- I. O Decantador 82C apresentou uma eficiência de remoção da carga de ST em torno de 19%. Enquanto o Decantador 82E apresentou uma eficiência de remoção na ordem de 45%, considerando as quatro observações;
- II. O Decantador 82C apresentou uma variação no processo de transformação ocorrida no interior do decantador, entre geração e acúmulo. Enquanto o Decantador 82E apresentou somente um processo de transformação sob a condição de geração de sólidos no seu interior;
- III. O Decantador 82E por apresentar maior taxa de eficiência na remoção dos sólidos presentes no efluente teve, como consequência na saída do lodo maior carga de sólidos removidos;
- IV. Em ambos Decantadores observa-se, na fase líquido do tratamento, um aumento da Carga de sólidos totais na saída do tratamento, a exceção ficou para o Decantador 82C em apenas um dia do período estudado.

Portanto, observa-se uma Carga de sólidos totais superior no balanço de massa do Decantador 82E, justificado pela maior Taxa de aplicação de sólidos conforme apresentado na análise de sólidos. o inverso ocorre no Decantador 82C.

Além disso, conforme já mencionado a origem dos afluentes que alimentam os Decantadores também exerce um fator importante considerando, já que originalmente a qualidade do afluente do Decantador 82E apresenta uma concentração de sólidos maior quando comparado ao Decantador 82C.

E por fim, a observação da geração de sólidos no interior dos decantadores se deve ao fato inerente ao processo que se refere a presença de soda cáustica (NaOH) no efluente bruto, alinhada a reação de neutralização que ocorre no meio



pelo uso de ácido sulfúrico, formando o sulfato de sódio como subproduto do processo de tratamento, logo este acréscimo de sólidos é expresso em termos de sólidos dissolvidos.

Sobre a avaliação da Taxa de Aplicação Hidráulica observada nos dados monitorados ao contrário do decantador 82C, o decantador 82E apresenta suas Taxas de aplicação hidráulica superior ao mínimo indicado pelo Metcalf & Eddy (1991), mas manteve-se aderente a referência indicada para vazões máximas de projeto, e isto se deve ao fato de que o período estudado em ambas as amostras as vazões de entrada apresentaram um comportamento de carga baixa.

Nessa mesma lógica comparativa, agora com NBR 12.209/2011 ambos Decantadores não apresentaram aderentes a referência.

No entanto, as observações inaderentes não justificaram baixa performance de remoção de sólidos, principalmente os sólidos em suspensão, que alcançaram percentuais de eficiência acima de 90%. Fato este, devidamente subsidiado pela aderência as referências de projetos, conforme demonstrado pela **Figura 15** que apresenta a comparação entre as referidas taxas observadas com as calculadas com dados de projeto.

Outro ponto a ressaltar, trata-se da comparação das Taxas de aplicação hidráulica entre os Decantadores, onde observa-se que o 82E apresenta maiores taxas devido sua área superficial ter menores dimensões comparado a 82C.

Sobre a avaliação da Taxa de Aplicação de sólidos observa-se que ambos os decantador 82C e o 82E uma taxa inferior ao mínimo indicado pelo Metcalf & Eddy (1991), corroborando com a característica do efluente indicando uma qualidade mais inorgânica do que orgânica, conforme observado na análise de sólidos.



## 7. REFERÊNCIAS

AQUIM, P. M. Balanço de massa: uma ferramenta para a implementação de melhorias nos processos de ribeira e curtimento. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987. 23 p.

CAVALCANTI, JOSÉ EDUARDO W. DE A; Manuel de tratamento de efluentes industriais. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2009.

CLEVERSON, A. V; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná. v. 6, n. 484 p. 2001.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. -- São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

DURAKOVIC, BENJAMIN. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Sarajevo Bosnia and Herzegovina, v. 5, n. 3, p. 421-439, dez. 2017.

INHOFF, KLAUS R; KARL. Manual de tratamento de águas residuárias, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP. 301 p, 1996.

LEGASYS. Análise Crítica dos Dados de Automonitoramento de Efluente, Barcarena, Pará, Brasil. 32 p, dezembro 2022.

METCALF & EDDY (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. Metcalf & Eddy, Inc. 3. Ed, 1334 pp.

PROJETO PROSAB. Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água – Marco Antonio Penalva Reali (Coordenador). Rio de Janeiro, ABES, 1999. 240 p.



SANTOS, A. B. Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais. Fortaleza: Imprece, 2019. 812 p.

SECKLER SIDNEY, FERREIRA. Princípios, fundamentos e processos em engenharia ambiental, Santana de Parnaíba, São Paulo, 1.ed., 938 p. 2021.

VON SPERLING, M. Estudo e modelagem da qualidade da água de rios, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal de Minas Gerais; v. 7, n. 588 p. 2007.

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgoto, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal de Minas Gerais; v. 2, n. 211 p. 1996.

LEGASYS. Análise Crítica dos Dados de Automonitoramento de Efluente, Barcarena, Pará, Brasil. 32 página, dezembro 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209: Elaboração de projetos hidráulicos-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários: Referências. Rio de Janeiro, p. 53. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.216: Elaboração de projetos hidráulicos-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários: Referências. Rio de Janeiro, p. 18. 1992.