



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Avaliação do Ciclo de Vida de Construção de
uma ETE do tipo Lagoa de Estabilização:
Estudo de caso aplicado no município de São
Luís - MA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Poliana Lima Rocha

2023

Poliana Lima Rocha

Avaliação do Ciclo de Vida de Construção de uma ETE do tipo Lagoa de Estabilização: Estudo de caso aplicado no município de São Luís - MA

Defesa da Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Belém, 21 de março de 2023.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R672a Rocha, Poliana Lima.
Avaliação do Ciclo de Vida de Construção de uma ETE do tipo
Lagoa de Estabilização : estudo de caso aplicado no município de
São Luís - MA / Poliana Lima Rocha. — 2023.
113 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. : Estação de Tratamento de Efluentes. 2. Avaliação do
Ciclo de Vida (ACV). 3. Método CML. 4. Impactos na
Construção Civil. I. Título.

CDD 624

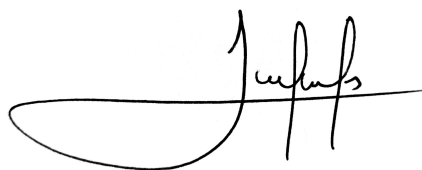
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CONSTRUÇÃO DE UMA ETE DO TIPO LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO APLICADO NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS – MA

AUTORA:

POLIANA LIMA ROCHA

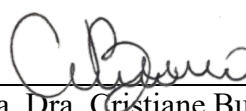
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 21 / 03 / 2023.



BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Orientador



Profa. Dra. Cristiane Bueno
Membro Externo (UFSCAR)



Documento assinado digitalmente

FREDERICO GUILHERME PAMPLONA MOREI

Data: 24/03/2023 11:47:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Frederico Guilherme Pamplona Moreira
Membro Interno (UFPA)



Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho à minha família em especial

Aos meus pais Vicente e Obede

À minha irmã Priscila Lima

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por todos os livramentos e bênçãos recebidas durante a minha jornada.

Aos meus amados pais, Vicente e Obede, por serem exemplos de pais e que sempre me ensinaram que o estudo é o melhor caminho a ser seguido. Obrigada por todo auxílio, carinho e incentivo durante toda minha vida. Amo muito vocês!

A minha irmã, Priscila, por ser a minha maior inspiração em todas as áreas da vida! Obrigada por todos os incentivos, conselhos, carinho e amizade. Te amo muito!

Ao meu orientador, Prof^o. Dr. Luiz Maurício, por sua excelente orientação, por todos os conhecimentos partilhados, pela admirável disponibilidade, compreensão e busca incessante por excelência em sua profissão. Seu apoio foi fundamental para a conclusão deste estudo. Sou muito grata pelo acolhimento e confiança dados a mim durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Sr. Almeida, Dilvan e Erickson, pela concessão de dados para o desenvolvimento da pesquisa e pela disponibilidade fornecida durante o estudo, sempre de maneira muito prestativa.

À Ilmarana, por sua lealdade, amizade, incentivo e companheirismo partilhados durante toda nossa amizade, principalmente, nessa etapa desafiadora que foi o mestrado. Obrigada por tudo, minha amiga amada!

Ao Rommisson, pelo seu enorme incentivo, grande companheirismo e pelas dicas compartilhadas. Seu apoio, carinho e leveza foram essenciais nesta fase!

Aos amigos que a UFPA me presenteou, Karina e Ronaldo. Vocês foram essenciais durante o mestrado. Karina, obrigada por toda cumplicidade, humildade, conhecimentos partilhados, acolhimento na cidade de Belém-PA, confiança e momentos de leveza. Ronaldo, sou grata por sua amizade, pelos aprendizados, por todo o incentivo dado nessa etapa final e pela enorme confiança. Vocês dois são exemplos de profissionais humanos e capacitados.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e por suas importantes contribuições na pesquisa desde a etapa de qualificação.

Ao Programa de Bolsas de Pesquisa Maranhense – FAPEMA – pelo incentivo a esta pesquisa.

Ao PPGEC – UFPA, em especial, à Sanny, por toda a disponibilidade concedida durante o mestrado.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

O setor da construção civil ocasiona diversos impactos no ecossistema. No cenário correspondente ao saneamento básico, os impactos causados por estações de tratamento de esgoto (ETE) são normatizados apenas em relação ao destino e manejo dos efluentes. Diante aos efeitos que são desencadeados durante a etapa de construção de uma ETE, surge a necessidade analisar as reais consequências geradas durante o processo construtivo. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar de forma quantitativa os potenciais de impactos ambientais associados a uma ETE do tipo Lagoa de Estabilização, durante sua fase construção, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A unidade funcional adotada foi de 1 m³ de efluente tratado para um período de 20 anos. O estudo da ACV utilizou o software SimaPro 9.11, o banco de dados da Ecoinvent e o método CML – sendo escolhidas 6 categorias de impacto. Os resultados apontaram a categoria de ecotoxicidade aquática marinha como a classe mais expressiva, com percentual de 96,01%. De forma específica, as entradas que obtiveram maiores contribuições em cada categoria foram: depleção abiótica (geomembrana com 51,02%), aquecimento global (cimento com 36,13%), destruição da camada de ozônio (diesel com 28,48%), ecotoxicidade aquática marinha (geomembrana com 44,98%), acidificação (grama com 39,02%) e eutrofização (grama com 42,6%). Os resultados destacaram a importância da ACV na identificação dos impactos gerados na etapa construtiva de uma ETE, além de auxiliar em tomadas de decisões futuras, a fim de buscar alternativas mais sustentáveis dos itens mais causadores de impactos ambientais.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Efluentes; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Método CML; Impactos na Construção Civil

ABSTRACT

The construction sector causes several impacts on the ecosystem. In the scenario corresponding to basic sanitation, the impacts caused by sewage treatment plants (WWTP) are standardized only in relation to the destination and management of effluents. Given the effects that are triggered during the construction stage of a WWTP, there is a need to analyze the real consequences generated during the construction process. In this sense, this research had as main objective to quantitatively evaluate the potential of environmental impacts associated with a WWTP of the Stabilization Lagoon type, during its construction phase, through the Life Cycle Assessment (LCA). The functional unit adopted was 1 m³ of treated effluent for a period of 20 years. The LCA study used the SimaPro 9.11 software, the Ecoinvent database and the CML method – 6 impact categories were chosen. The results indicated the category of marine aquatic ecotoxicity as the most expressive class, with a percentage of 96.01%. Specifically, the entries that obtained the greatest contributions in each category were: abiotic depletion (geomembrane with 51.02%), global warming (cement with 36.13%), destruction of the ozone layer (diesel with 28.48%), marine aquatic ecotoxicity (geomembrane with 44.98%), acidification (gram with 39.02%) and eutrophication (gram with 42.6%). The results highlighted the importance of LCA in identifying the impacts generated in the construction stage of a WWTP, in addition to assisting in future decision-making, in order to seek more sustainable alternatives of the items most causing environmental impacts.

Keywords: Effluent Treatment Station; Life Cycle Assessment (LCA); CML method; Impacts on Civil Construction

“A sustentabilidade consiste em construir pensando no futuro”
(Renzo Piano)

SUMÁRIO

| Capítulo | Página |
|--|--------|
| INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa..... | 15 |
| 1.2 Objetivos da Pesquisa..... | 18 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho..... | 18 |
| REFERENCIAL TEÓRICO..... | 20 |
| 1.4 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) | 20 |
| 1.4.1 Lagoas de Estabilização..... | 23 |
| 1.4.2 Aspectos construtivos de lagoas de estabilização..... | 27 |
| 1.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) | 32 |
| 1.5.1 Considerações Iniciais | 32 |
| 1.5.2 Estrutura Metodológica da ACV | 33 |
| 1.5.3 Aplicações de ACV em ETES na Etapa de Construção | 44 |
| MATERIAIS E MÉTODOS..... | 48 |
| 1.6 Pesquisa Científica | 48 |
| 1.7 Delineamento da Pesquisa..... | 49 |
| 1.7.1 Abordagem ao Tema | 50 |
| 1.7.2 Desenvolvimento da Pesquisa | 50 |
| 1.7.3 Análise e Interpretações dos Resultados | 62 |
| ESTRUTURA DA ACV | 63 |
| 1.8 Definição de Objetivo e Escopo..... | 63 |
| 1.8.1 Objetivo da ACV | 63 |
| 1.8.2 Escopo da ACV | 63 |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 71 |
| 1.9 Fluxos de Referência de Construção da ETE..... | 71 |
| 1.10 AICV de Construção da ETE | 74 |
| CONCLUSÕES..... | 85 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 87 |
| REFERÊNCIAS | 88 |
| APÊNDICE | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Quantidade de ETEs em função do tipo de tecnologia em amostra feita na América Latina | 22 |
| Tabela 2 - Materiais utilizados na etapa de construção em kg | 55 |
| Tabela 3 - Consumo em litros dos maquinários utilizados na etapa de construção da ETE | 57 |
| Tabela 4 - Total de combustível utilizado no maquinário em kg | 58 |
| Tabela 5 - Veículos adotados no transporte de materiais | 59 |
| Tabela 6 - Classificação dos veículos utilizados para transporte no padrão EURO e valor total em t.km | 60 |
| Tabela 7 - Volume total de esgoto tratado durante 20 anos de operação da ETE | 65 |
| Tabela 8 – Fluxos de Referência para a etapa de construção da ETE | 72 |
| Tabela 9 - Resultados totais da AICV estudada utilizando o método CML I-A baseline v3.06 | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma de Tratamento de Águas Residuais | 22 |
| Figura 2 - Consumo de Energia em vários Processos de Tratamento de Efluentes | 24 |
| Figura 3 - Descrição dos tipos de Lagoas de Estabilização..... | 25 |
| Figura 4 - Sistemas de Lagoas de Estabilização..... | 27 |
| Figura 5 - Elementos integrantes de um Dique de Lagoas | 29 |
| Figura 6 - Aspectos Construtivos dos Taludes | 30 |
| Figura 7 - Ciclo de Vida de um Produto..... | 32 |
| Figura 8 - Fases de uma ACV | 34 |
| Figura 9 - Etapas da Análise de Inventário do Ciclo de Vida | 36 |
| Figura 10 - Métodos de Alocações mais usuais | 38 |
| Figura 11 - Simplificação de 5 Bases de Dados utilizadas internacionalmente | 38 |
| Figura 12 - Elementos da Fase de AICV..... | 40 |
| Figura 13 - Técnicas de Análise Adicional da Qualidade dos Dados da AICV..... | 42 |
| Figura 14 - Relacionamento dos Elementos da Fase de Interpretação com as outras Fases da ACV..... | 43 |
| Figura 15 - Alguns Estudos envolvendo a Etapa de Construção em ETEs..... | 46 |
| Figura 16 - Delineamento da Pesquisa | 49 |
| Figura 17 - Localização da ETE estudada..... | 51 |
| Figura 18 - Detalhamento das bacias de sanitização | 52 |
| Figura 19 - Interface do software Simapro versão 9.11 | 61 |
| Figura 20 - Interface do software MiniTab Statistical..... | 61 |
| Figura 21 - Fronteira do Sistema | 66 |
| Figura 22 - Matriz Pedigree utilizada para avaliar a qualidade de dados dos Fluxos de Referência de construção em estudo | 67 |
| Figura 23 - Ordenamento decrescente baseado na correlação dos fluxos de referências de construção da ETE..... | 73 |
| Figura 24 - Gráfico de resultados totais da AICV estudada utilizando o método CML I-A baseline v3.06 | 75 |
| Figura 25 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) utilizando o Método CML I-A baseline v3.06..... | 76 |
| Figura 26 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Aquecimento Global utilizando o Método CML I-A baseline v3.06 | 77 |
| Figura 27 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Destruição da Camada de Ozônio utilizando o Método CML I-A baseline v3.06..... | 78 |
| Figura 28 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Ecotoxicidade Aquático Marinha utilizando o Método CML I-A baseline v3.06..... | 79 |
| Figura 29 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Acidificação utilizando o Método CML I-A baseline v3.06 | 80 |
| Figura 30 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Eutrofização utilizando o Método CML I-A baseline v3.06 | 81 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| Sigla | Significado |
|-----------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| CML | Center for Environmental Science of Leiden University |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgoto |
| ICV | Inventário do Ciclo de Vida |
| PLANSAB | Plano Nacional de Saneamento Básico |
| UASB | Upflow Anaerobic Sludge Blanket |

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e justificativa da pesquisa

O papel do saneamento básico é de grande relevância para as sociedades, constituindo-se em um direito estabelecido pela Lei nº 11.445/2007. Assim, uma das concepções desta legislação baseia-se na universalização do acesso aos serviços de saneamento básico, bem como a prestação efetiva dos mesmos, garantindo a toda população infraestruturas que possam servir-las de abastecimentos de água, esgotamentos sanitários, limpezas urbanas dentre outras atividades (ALCANTARA; PINTO, 2021).

Apesar da existência de políticas que asseguram o fornecimento de saneamento básico no Brasil, mais precisamente, o esgotamento sanitário, este ainda se mostra precário em algumas regiões do país. Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (2019), a situação do tratamento de efluentes que são gerados no Brasil apresentaram uma menor taxa na macrorregião Norte em comparação com as demais regiões, com uma porcentagem de apenas 22,6% de esgotos são tratados, exigindo uma maior infraestrutura que possa atender essa demanda e garantir melhor qualidade de vida aos cidadãos.

Diante desse cenário, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) apresentam-se como uma infraestrutura de contribuição para a melhoria desse déficit no saneamento brasileiro. Uma ETE é constituída por um conjunto formado por unidades de tratamento, equipamentos e órgãos que tem como objetivo a atenuação das cargas poluidoras oriundas do esgotamento sanitário e do processo de condicionamento dos resíduos derivados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). Dessa forma, esse sistema é uma estrutura fundamental na esfera do saneamento básico e preservação do meio ambiente.

Com relação aos impactos gerados pelas ETEs, apenas o destino e manejo dos efluentes são normatizados por lei para a proteção dos corpos hídricos. Neste quesito, o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA – apresenta normativas que estão documentadas nos regimentos de nº 357/2005 e nº 430/2011, fornecendo padrões de lançamento de efluentes. Entretanto, não há outros regimentos que abordem distintos impactos ambientais que são gerados durante a implantação/construção de uma ETE.

O processo de implantação de obras, seja de infraestrutura ou habitacional, causa diversos impactos no ecossistema (MARINKOVIĆ *et al.*, 2017). A indústria produtora de concreto é a principal colaboradora para o aquecimento global no planeta, devido às inúmeras substâncias que são produzidas durante o ciclo de vida deste produto (COLANGELO *et al.*, 2018). O cimento, por exemplo, que é um dos principais constituintes do concreto, sobressai como um grande emissor de dióxido de carbono para a atmosfera. Conforme Ferraresi de Araujo (2020), a produção de cimento consome grandes volumes de combustíveis e eletricidade, além de liberar cerca de 5 a 7% de todas as emissões de CO₂ no meio ambiente.

De forma mais abrangente, estudos feitos por Ferreira (2018) mostram que, dentre os principais contribuintes de poluentes na construção civil, têm-se o cimento (20%), produtos químicos e petroquímicos (17%), ferro e aço (16%) assim como alumínio e metais não-ferrosos que participam com uma porcentagem de 5%. Estendendo-se a mais alguns fatores, tem-se outros impactos que também são obtidos durante o processo construtivo, como por exemplo, os resíduos que são gerados. Estudos apontam que mais de 50% dos resíduos sólidos que são resultantes das atividades humanas, sejam oriundos da construção civil (DE CONTO; LUCAS DE OLIVEIRA; ELISA RUPPENTHAL, 2017). Dessa maneira, desenvolver construções sustentáveis que poderão reduzir os impactos ambientais que são ocasionados pelas atividades humanas é de extrema relevância.

Ciente dos efeitos que a construção civil pode ocasionar ao meio ambiente, faz-se necessário o estudo mais aprofundado sobre os reais impactos que são desencadeados no processo construtivo de uma Estação de Tratamento de Esgoto, objeto deste estudo. Assim, é fundamental aplicar estudos confiáveis para fazer esta análise. Logo, entre as análises disponíveis, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desempenha um papel de grande relevância.

Segundo Pons *et al.*, (2018), a ACV é de grande importância para quantificar e avaliar cada tipo de impacto do objeto em estudo. Apesar de existirem, ultimamente, diversas ferramentas de avaliações sustentáveis a serem utilizadas, é notória a grande concordância na comunidade científica para a adoção deste instrumento em diversas aplicações, incluindo tecnologias fim-de-tubo, como ETEs (LORENZO-TOJA *et al.*, 2018). E sobre essas técnicas referentes ao saneamento, a Avaliação do Ciclo de Vida, conforme Pryce, Memon e Kapelan (2021) tem sido bastante aplicada em tomadas de decisões para comparativo de cargas ambientais totais de variadas tecnologias, para o impacto de diferentes métodos durante toda a

fase de vida das ETEs e para o reconhecimento das fases mais onerosas do ciclo de existência das mesmas.

Diante do exposto, este trabalho será de grande contribuição científica, econômica e sustentável, visto que é significativa a obtenção de uma Avaliação de Ciclo de Vida na etapa de construção de uma estação de tratamento de esgoto para o cenário brasileiro.

De acordo com Lopes *et al.*, (2017), apesar da etapa de construção ser menos estudada se comparada com a fase de operação, esta não deve ser excluída. Assim, os mesmos autores complementam que os dados obtidos pelo Inventário do Ciclo de Vida deste estudo permitirão que sejam contabilizados os impactos e poderão auxiliar durante as tomadas de decisões futuras. Dessa maneira, deseja-se obter construções com melhores desempenhos no ramo sustentável e possibilitando um maior nível de atendimento dos serviços de saneamento básico nas regiões que se encontram deficientes.

Dessa maneira, é importante considerar a fase de construção em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de infraestruturas hídricas urbanas, como estações de tratamento de efluentes. Muitos estudos negligenciam esse estágio, mas essa etapa pode causar impactos negativos, representando riscos de aquecimento global e toxicidade humana. Além da ACV ser um método aplicado para quantificar os impactos ambientais associados a essas infraestruturas e identificar práticas mais efetivas nos modelos de caracterização disponíveis.

Portanto, diante do exposto acima supracitado, a pergunta da pesquisa estará relacionada em: "Quais impactos são gerados ao meio ambiente durante a etapa de construção de uma ETE do tipo lagoa de estabilização?"

1.2 Objetivos da Pesquisa

Considerando a justificativa da pesquisa anteriormente citada, este trabalho possui objetivos gerais e específicos descritos a seguir:

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar de forma quantitativa os potenciais de impactos ambientais associados a uma estação de tratamento de efluentes do tipo lagoa de estabilização durante a sua fase de construção, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Elaborar uma ACV para a etapa de construção da ETE estudada;
- b. Identificar a colaboração dos itens de entrada referentes às etapas de construção da ETE em foco e seus principais causadores de impactos ambientais por meio da interpretação dos resultados gerados pelo *software* SimaPro 9.1.1[®].

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em sete capítulos que estão detalhados da seguinte forma:

Capítulo 1: refere-se à introdução com uma abordagem geral a cerca do tema trabalhado, a justificativa e a pergunta da pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos.

Capítulo 2: aborda os conceitos relacionados às estações de tratamento de efluentes, etes do tipo lagoa de estabilização e seus aspectos construtivos; compreensões sobre avaliação do ciclo de vida e suas etapas, assim como a aplicação da ACV em construções de etes.

Capítulo 3: apresenta os conceitos relacionados à pesquisa científica, como também os métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo proposto.

Capítulo 4: são retratados a estrutura da ACV de construção referente ao estudo de caso desta pesquisa.

Capítulo 5: são abordados os resultados obtidos no estudo, bem como as discussões associadas aos fluxos de referência de construção da ete e as avaliações de impacto do ciclo de vida de construção da estação de tratamento de esgoto em foco.

Capítulo 6: discorre as conclusões gerais da pesquisa.

Capítulo 7: apresenta sugestões para trabalhos futuros.

REFERENCIAL TEÓRICO

1.4 Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

Nos países em desenvolvimento, o processo de tratamento de águas residuais melhorou de forma considerável, contudo continua sendo um grande desafio para a sustentabilidade (GALLEGO-SCHMID; TARPANI, 2019). Cerca de 3,6 bilhões de pessoas ainda carecem de serviços de saneamento, que, aliados ao avanço da urbanização, do crescimento populacional e da precariedade da infraestrutura, elevam a disseminação de doenças, resultando em danos à saúde humana e ao meio ambiente (UNICEF, 2019).

Segundo dados do ANA (2022), a situação brasileira denota que 55 % da população possui esgotamento sanitário adequado; enquanto 18% possui seu esgoto coletado, mas não tratado – classificando-se como um serviço precário – e 27% não apresenta coleta e tratamento, tornando-se ausentes de serviço de coleta sanitária.

A definição de esgotos sanitários ou águas residuais são nomeadas como águas provenientes do sistema de abastecimento de água da população, que, após utilizadas em diversas utilidades domésticas, industriais e comunitárias, são apanhadas pela rede de esgotamento lhes destinando de forma apropriada (MARA,1976). Segundo Mendonça e Mendonça (2017), as águas residuais podem ser classificadas de acordo com sua origem:

- a. Domésticas: consistem em resíduos humanos que chegam às redes por meio das descargas das instalações hidráulicas das edificações e em resíduos provenientes de estabelecimentos comerciais, públicos e similares;
- b. Industriais: resíduos oriundos de processos industriais, sendo característicos de cada tipo de indústria;
- c. Infiltrações e vazões adicionais: as águas invadem os sistemas de esgotamento por juntas de tubulações, defeitos nas paredes das tubulações, caixas de passagem, estruturas dos poços de visita e etc, além de águas pluviais descarregadas;
- d. Pluviais: referentes as águas pluviais que descarregam grandes quantidades de água sobre o solo.

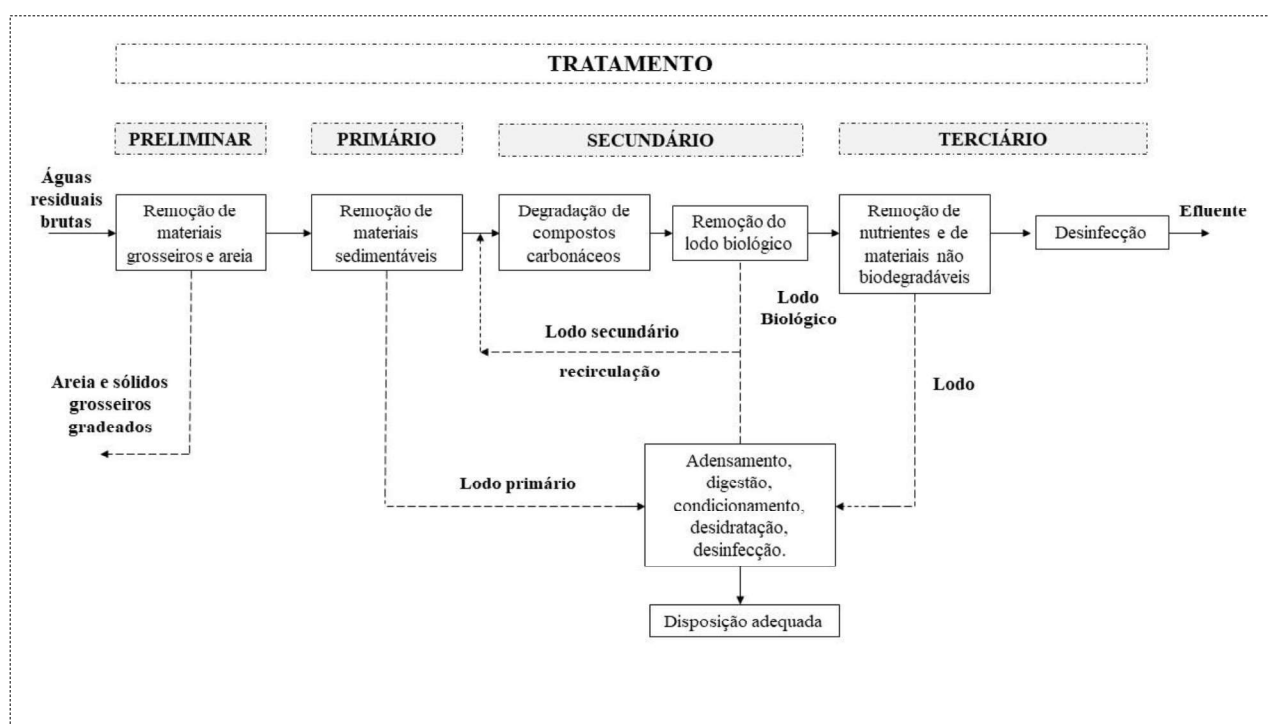
As estratégias tradicionais de saneamento configuram na implantação de sistema de coleta de esgotos e estações de tratamento de esgoto tradicionais centralizadas, sistemas estes que exigem uma equipe qualificada para as etapas de operação, manutenção e alto consumo energético (GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017). Conforme, Jordão e Pessoa (2011) as estações de tratamento de esgoto auxiliam na melhoria do aspecto estético dos corpos receptores, a proteção da saúde pública, o controle da demanda carbonácea de oxigênio, controle de nutrientes (fosfóro e nitrogênio) que são lançados nos corpos hídricos, o controle de substâncias tóxicas e compostos refratários e a preservação do ambiente em torno da instalação, em especial, o odor.

Portanto, uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) têm como função remover poluentes provenientes do esgoto afim de gerar efluentes que podem ser descartados ou reaproveitados com impactos ambientais reduzidos e seguindo as normas de descartes locais ou nacionais (HERNÁNDEZ-PADILLA *et al.*, 2017). Reduzindo, dessa maneira, a poluição.

Segundo, Mendonça e Mendonça (2017), as principais fases envolvendo o processo de tratamento de esgotos domésticos constituem-se em tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário. O tratamento preliminar envolve a remoção de sólidos suspensos grosseiros e suspensos fixos (principalmente areia). O tratamento primário tem como objetivo remover os sólidos sedimentáveis e de parte da matéria orgânica (inclui também, a sedimentação ou a flotação de partículas suspensas). Enquanto o tratamento secundário, destina-se à degradação biológica dos compostos carbonáceos. E por fim, o último tratamento, tem por objetivo a remoção de nutrientes, assim como a desinfecção e a remoção de compostos tóxicos e contaminantes específicos.

A figura 1 abaixo esquematiza um sistema completo de tratamento de esgoto constituídos das etapas descritas no parágrafo anterior:

Figura 1 - Fluxograma de Tratamento de Águas Residuais



Fonte: Adaptado de Campos (1994)

Em países tropicais, como o Brasil, em razão das temperaturas médias mais elevadas, os processos biológicos podem ser mais simples e econômicos. Os métodos de tratamento de esgotos mais utilizados são: os sistemas de lagoas de estabilização, lagoas aeradas mecanicamente, reator anaeróbio (*upflow anaerobic sludge blanket* – UASB), valos de oxidação tipo Pasveer e sistema *wetlands*. (MENDONÇA E MENDONÇA, 2017). A tabela 1 abaixo apresenta um resultado de amostragem em seis países da América Latina (Brasil, Chile, Colômbia, Guatemala, México e República Dominicana) em relação à tecnologia de tratamento mais utilizada, possuindo o sistema de lagoas de estabilização com maior índice percentual de uso e, também, foco desta pesquisa.

Tabela 1 - Quantidade de ETES em função do tipo de tecnologia em amostra feita na América Latina

| Tipo de ETES | Quantidade/Porcentagem |
|-------------------------|------------------------|
| Lagoas de Estabilização | 1.106 (38%) |

| | |
|------------------------------|-----------|
| Lodos Ativados | 760 (26%) |
| UASBs | 493 (17%) |
| Lagoas aeradas | 140 |
| Wetlands | 137 |
| Filtros biológicos | 125 |
| Tanques Imhoff | 84 |
| Filtro anaeróbio | 54 |
| Tratamento primário avançado | 18 |
| Filtro submerso aeróbio | 10 |
| Biodiscos | 6 |

Fonte: Adaptado de Noyola, Morgun-Sagastume e Gureca (2013).

1.4.1 Lagoas de Estabilização

As lagoas de estabilização são processos de tratamento de esgoto que são utilizadas principalmente na remoção de matéria orgânica, alcançando elevadas eficiências de remoção de microorganismos patogênicos (ALVES *et al.*, 2019). Segundo a Norma 230 (2009), os sistemas de lagoas de estabilização são definidos como:

Corpo de água lântico, construído pelo homem, e destinado a armazenar resíduos líquidos de natureza orgânica (esgoto sanitário e despejos industriais orgânicos biodegradáveis). Seu tratamento é feito através de processos naturais: físicos, biológicos e bioquímicos, denominados de autodepuração ou estabilização.

As lagoas de estabilização constituem-se com um método de tratamento de esgoto existente mais simples. Em geral, consistem em tanques que são construídos de forma artificial por escavações pouco profundas, cercados por taludes de terra – sendo mais eficientes, quando em formato retangular ou quadrado (PEARSON, 1996). As lagoas representam um sistema de

tratamento biológico em que a estabilização da matéria orgânica dar-se-á pela oxidação bacteriológica – oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia (PURGARE, 2020).

Podem ser projetadas, construídas e operadas adequadamente e, assim, permitem a redução de seis ordens de magnitude de bactérias e três ordens de magnitude de nematóides. Além disso, correspondem ao único sistema natural de tratamento de esgoto que pode exercer com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) para irrigação irrestrita sem necessidade de desinfecção adicional (MENDONÇA, 2001).

Dentre as desvantagens relacionadas as lagoas de estabilização, tem-se a disponibilidade de uma maior área de terreno, se comparada aos outros tipos de tratamento (MENDONÇA E MENDONÇA, 2017). As vantagens existentes em uma lagoa de estabilização, de acordo com Mendonça (2001), estão enumeradas abaixo:

- a. Baixo custo;
- b. Não necessitam de componentes importados;
- c. Simples de serem construídos e operados;
- d. Confiáveis e fáceis de serem mantidos;
- e. Podem absorver aumentos bruscos de cargas hidráulicas ou orgânicas;
- f. Podem ser usadas como sistema reguladores para irrigação;
- g. Adaptam-se facilmente a variações sazonais;
- h. Podem tratar despejos industriais facilmente biodegradados;
- i. Têm elevada estabilização da matéria orgânica;
- j. Produzem efluente de alta qualidade com excelente redução de micro-organismos patogênicos;
- k. Consumo energético nulo.

Em relação ao consumo energético praticamente nulo das lagoas de estabilização, a figura 2 abaixo, apresenta o consumo anual de energia de vários tipos de tecnologias de tratamento nos Estados Unidos (EUA) para uma vazão de 3.780 m³/dia:

Figura 2 - Consumo de Energia em vários Processos de Tratamento de Efluentes

| Processo de Tratamento | Consumo de Energia (kWh/ano) |
|------------------------|------------------------------|
| <i>Lodos Ativados</i> | 1.000.000 |
| <i>Lagoas Aeradas</i> | 800.000 |
| <i>Biodiscos</i> | 120.000 |

| | |
|--------------------------------|-------------|
| <i>Lagoas de Estabilização</i> | NULO |
|--------------------------------|-------------|

Fonte: Adaptado de Mara (1998)

De acordo com Von Sperling (2013) as lagoas de estabilização possuem diversos variantes com distintos níveis de simplicidade operacional e requisitos de área, podendo ser do tipo : lagoas facultativas, sistemas de lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas, lagoas aeradas facultativas e sistema de lagoas aeradas de mistura completa seguidas por lagoas de decantação e lagoas de maturação. A figura 3, a seguir resume as principais descrições dos tipos de lagoas, bem como suas vantagens e desvantagens. E em seguida, na figura 4, estão esquematizados os tipos de lagoas existentes.

Figura 3 - Descrição dos tipos de Lagoas de Estabilização

| Sistema | Descrição | Vantagens | Desvantagens |
|--|--|---|--|
| Lagoa Facultativa | A DBO solúvel e finamente particulada é estabilizada aerobicamente por bactérias dispersas no meio líquido, ao passo que a DBO suspensa tende a sedimentar, sendo convertida anaerobicamente por bactérias no fundo da lagoa. O oxigênio requerido pelas bactérias aeróbias é fornecido pelas algas, por meio de fotossíntese. | <ul style="list-style-type: none"> *Satisfatória eficiência na remoção de DBO; *Razoável eficiência na remoção de patógenos; *Construção, operação e manutenção simples; *Reduzidos custos de implantação e operação; *Ausência de equipamentos mecânicos; *Requisitos energéticos praticamente nulos; *Satisfatória resistência a variações de carga; *Remoção de lodo necessária apenas após períodos superiores a 20 anos. | <ul style="list-style-type: none"> *Elevados requisitos de área; *Dificuldade em satisfazer padrões de lançamento restritivos; *Simplicidade operacional pode trazer descaso na manutenção (aumento da vegetação); *Possível necessidade de remoção de algas do efluente para o cumprimento de padrões rigorosos; *Performance variável com as condições climáticas (temperatura e insolação); *Possibilidade de crescimento de insetos. |
| Lagoa Anaeróbia-lagoa facultativa | A DBO é em torno de 50 a 70% removida na lagoa anaeróbia, enquanto a DBO remanescente é removida na lagoa facultativa. O sistema ocupa uma área inferior ao de uma lagoa facultativa única. | <ul style="list-style-type: none"> *Idem lagoas facultativas; *Requisitos de áreas inferiores aos das lagoas facultativas únicas. | <ul style="list-style-type: none"> *Idem lagoas facultativas; *Possibilidade de maus odores na lagoa anaeróbia; *Necessidade de um afastamento razoável às residências próximas; *Necessidade de remoção contínua ou periódica do lodo da lagoa anaeróbia. |

| | | | |
|---------------------------------|--|---|---|
| Lagoa Aerada Facultativa | Os mecanismos de remoção de DBO são similares aos de uma lagoa facultativa. Porém, o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, ao invés do processo de fotossíntese. Como a lagoa é também facultativa, uma grande parte dos sólidos do esgoto e da biomassa sedimenta, sendo decomposta anaerobicamente no fundo. | <ul style="list-style-type: none"> *Construção, operação e manutenção relativamente simples; *Requisitos de área inferiores aos sistemas de lagoas facultativas e anaeróbio-facultativas; *Maior independência das condições climáticas que os sistemas de lagoas facultativas e anaeróbio facultativas; *Satisfatória resistência a variações de carga; *Reduzida possibilidade de maus odores. | <ul style="list-style-type: none"> *Introdução de equipamentos; *Ligeiro aumento no nível de sofisticação; Requisitos de área ainda elevados; *Requisitos de energia relativamente elevados; *Baixa eficiência na remoção de coliformes; *Necessidade de remoção contínua ou periódica do lodo. |
|---------------------------------|--|---|---|

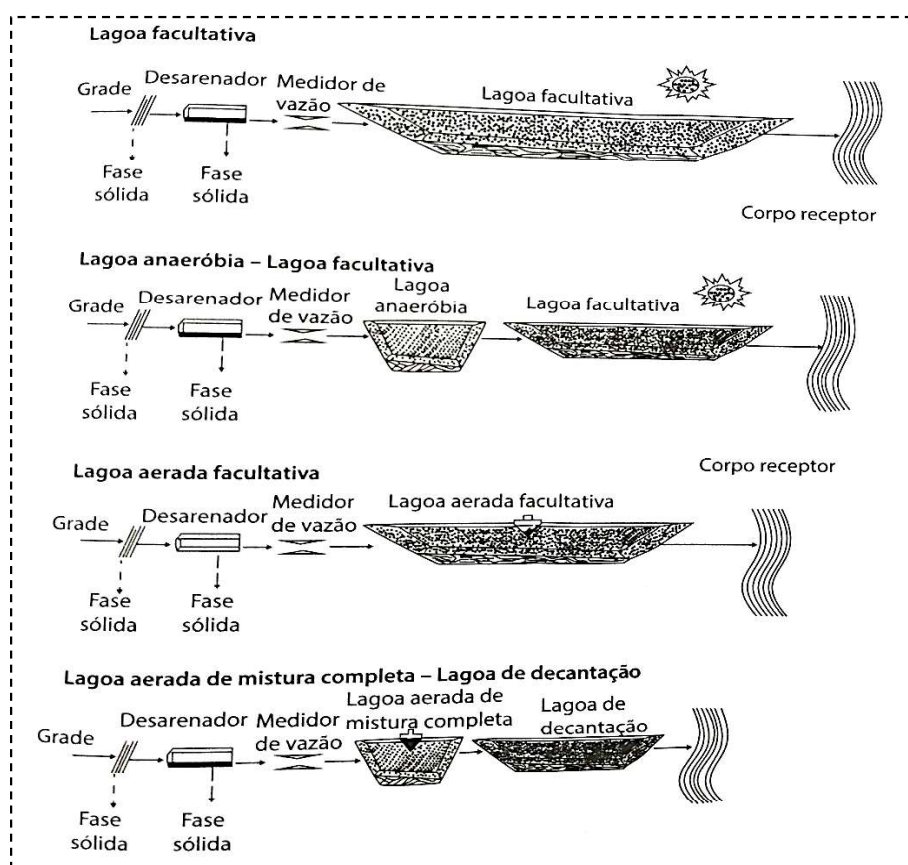
Continuação ... Figura 3 – Descrição dos Tipos de Lagoas de Estabilização

| Sistema | Descrição | Vantagens | Desvantagens |
|---|--|---|--|
| Lagoa Aerada de mistura completa – lagoa de decantação | A energia introduzida por unidade de volume da lagoa é elevada, fazendo com que os sólidos permaneçam dispersos no meio líquido, ou em mistura completa. A decorrente maior concentração de bactérias no meio líquido aumenta a eficiência do sistema na remoção do DBO, permitindo que a lagoa tenha um volume inferior ao de uma lagoa aerada facultativa. A lagoa de decantação a jusante proporciona condições para esta remoção. O lodo deve ser removido em períodos de poucos anos. | <ul style="list-style-type: none"> *Idem lagoas aeradas facultativas; *Menores requisitos de área de todos os sistemas de lagoas | <ul style="list-style-type: none"> *Idem lagoas aeradas facultativas – exceto nos requisitos de área; *Preenchimento rápido da lagoa de decantação com lodo – 2 a 5 anos; *Necessidade de remoção contínua ou periódica – 2 a 5 anos do lodo. |
| Lagoa de Maturação | O principal objetivo da lagoa de maturação é remover os organismos patogênicos. Nessas lagoas predominam condições ambientais adversas para bactérias patogênicas. As lagoas de maturação constituem um pós-tratamento de processos que objetivam a remoção da DBO, sendo projetadas como uma série de lagoas, ou como uma lagoa única com divisões por chicanas. A sua eficiência em | <ul style="list-style-type: none"> *Idem sistema de lagoas precedente; *Elevada eficiência na remoção de patógenos; *Razoável eficiência na remoção de nutrientes. | <ul style="list-style-type: none"> *Idem sistema de lagoas precedente; *Requisitos de área bastante elevados. |

| | | | |
|--|------------------------------------|--|--|
| | remoção de coliformes é altíssima. | | |
|--|------------------------------------|--|--|

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2013)

Figura 4 - Sistemas de Lagoas de Estabilização



Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996)

1.4.2 Aspectos construtivos de lagoas de estabilização

Apesar dos projetos de lagoas de estabilização serem mais simples, o processo construtivo das mesmas exige um amplo trabalho de engenharia, que se inicia após a definição

da área necessária e da escolha do local a ser construído (MENDONÇA E MENDONÇA, 2017).

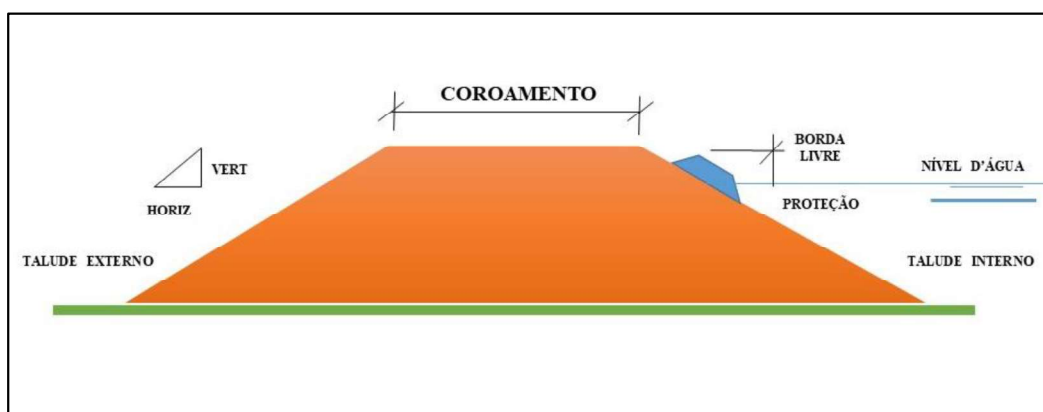
Alguns itens devem ser considerados, segundo Von Sperling (2013):

a. Locação das Lagoas:

- Disponibilidade de área: a disponibilidade de área influencia na seleção do tipo de lagoa a ser adotada;
- Localização da área em relação ao local de geração de esgoto: quanto mais próximo, menores os custos de transportes de efluentes;
- Localização da área em relação ao corpo receptor: as proximidades ao corpo receptor reduzem os custos de transportes ao destino final;
- Localização da área em relação as residências próximas: devem estar com um afastamento de no mínimo 500 m das residências mais próximas, em vista da possibilidade de maus odores; as outras lagoas esse afastamento pode ser menor;
- Cotas de inundação: é necessário verificar se o terreno é inundável e a que nível chegam as possíveis inundações, para assim serem definidas às alturas dos taludes;
- Nível do lençol freático: o nível do lençol freático determina o nível de assentamento das lagoas e a necessidade de impermeabilização no fundo;
- Topografia da área: possui grande influência no movimento de terra e em que topografias pouco íngremes são preferenciais;
- Características do solo: o tipo de solo influencia no planejamento da compensação entre o corte e o aterro, na necessidade de material de empréstimo, na inclinação de taludes, nos custos e na impermeabilização do fundo;
- Forma da área: influencia no arranjo das diversas unidades em planta;
- Ventos: a localização da lagoa deve permitir o livre acesso do vento, o qual é importante para se garantir uma mistura suave na lagoa;
- Condições de acesso: não deve ser inacessível, visto que será necessário o acesso das equipes da obra e das futuras operações e manutenções;
- Facilidades de aquisição do terreno: caso seja dificultoso a desapropriação de áreas, torna-se um elemento de grande inviabilização de locação;

- Custos do terreno: áreas urbanas ou próximas ou de algum elemento de importância, o custo do terreno pode torna-se elevado, sendo necessário adotar outras medidas mais compactas.
- b. Desmatamento, limpeza e escavação do terreno:
- Desmatamento: compreende a derrubada e o desenraizamento das árvores existentes no local onde será ocupado pela lagoa e vias de acesso. A derrubada deverá ser aprovada pelo órgão ambiental competente;
 - Limpeza: após a derrubada, são feitos os deslocamentos e a remoção dos vegetais de porte menor, que em grande maioria são queimados no próprio local. Por meio de motoniveladoras é feita a raspagem superficial do terreno.
 - Escavação: podem obter duas situações – material escavado aproveitável ou inaproveitável. A primeira situação é mais desejada, visto que minimiza os movimentos de terra.
- c. Taludes:
- Alguns aspectos construtivos devem ser considerados em relação aos taludes como apresentado figura 6 abaixo e também ilustrado na figura 5:

Figura 5 - Elementos integrantes de um Dique de Lagoas



Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996)

Figura 6 - Aspectos Construtivos dos Taludes

| Item | Comentário |
|--------------------------------------|---|
| Inclinação do Talude Interno | <ul style="list-style-type: none"> *Inclinação usual: 1:2 a 1:3; *Inclinação mínima: 1:6 *Inclinação máxima: 1:2; *Terrenos argilosos: inclinação > a 1:2; *Terrenos arenosos: inclinação entre 1:3 a 1:6; |
| Inclinação do Talude Externo | <ul style="list-style-type: none"> *Inclinação usual: 1:1,5 a 1:2; *Terrenos argilosos: inclinação > a 1:2,5; *Terrenos arenosos: inclinação entre 1:5 a 1:8; |
| Coroamento do Talude | *Largura superior a 1,5 m; usualmente entre 2,0 a 4,0 m – Permitindo a circulação de maquinário e tráfego de equipe; |
| Borda Livre | <ul style="list-style-type: none"> *Pequenas lagoas (< 1 ha de área) adotar 0,5 m; * Lagoas entre 1 ha e 3 ha = 0,5 a 1,0 m; * Lagoas maiores: borda livre = $[\log (\text{área lagoa})]^{0,5} - 1$ (área em m²); <p>*Objetivo: garantir a segurança contra o aumento do nível da água além das condições de projeto e segurança contra recalque.</p> |
| Impermeabilização | <p>*Caso o material do dique seja permeável extremamente, pode ser necessária a impermeabilização do maço do dique com argila, geomembranas, estacas-pranchas ou lajes de concreto;</p> <p>*Após a compactação o coeficiente de permeabilidade deve ser $< 10^{-7}$ m/s;</p> |
| Proteção dos Taludes Internos | <p>*Os tipos de proteções mais empregados são os <i>rip-rap</i> (pedras com tamanho de 15 a 20 cm), laje de concreto (e = 7 e 13 cm, levemente armada), placas de concreto, argamassa armada, pavimentação asfáltica ou geomembrana;</p> <p>*A proteção deve se estender por pelo menos 0,5 m acima e 0,5 m abaixo no nível da água;</p> <p>*Acima da proteção, deve-se colocar grama ou brita no restante do talude;</p> |
| Taludes Externos | *O talude externo deve ser gramado, para proteger contra a erosão; |

| | |
|-----------------------------|---|
| | |
| Canto dos Taludes | *As esquinas das lagoas devem ser ligeiramente arredondadas, facilitando a construção e a manutenção, e evitando pequenas zonas mortas; |
| Material dos Taludes | *Os diques devem ser construídos de terra, de preferência do próprio terreno ocupado; *O material deve ser denso, fino, coeso e bem granulado; *A sua constituição deve ser de (a) terra limpa, isenta de pedras ou matéria orgânica e de (b) argila com um pouco de areia; |
| Drenagem Pluvial | *Em lagoas que possuam alguma lateral constituída por um talude natural, deve-se efetuar a drenagem pluvial por meio de canaletas paralelas a esta lateral, evitando a passagem da água por cima do talude. |

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996)

d. Fundo das Lagoas:

- O fundo de uma lagoa não deve possuir permeabilidade excessiva que ocasionem contaminação do lençol freático e dificuldade na manutenção do nível do líquido nas lagoas. Esse processo deve ser verificado por meio de sondagens e a impermeabilização do fundo pode ser feita com camadas de argila, revestimento asfáltico e geomembranas plásticas;
- *OBS:* Em lagoas aeradas é necessária a instalação de uma placa de concreto abaixo de cada aerador, evitando assim, problemas de erosão causados pela turbulência do aerador;

e. Dispositivos de Entrada e Saída:

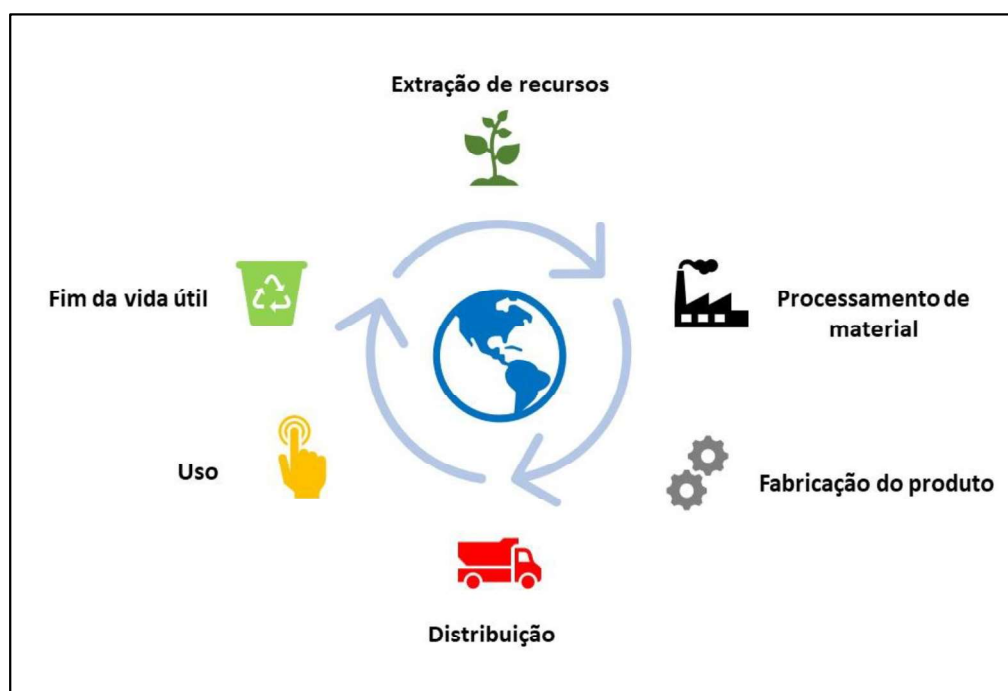
- Os dispositivos de entrada presentes no tratamento preliminar são compostos por: grades, caixa de areia e calha ou vertedor para medição da vazão;
- Existem diversos dispositivos de saída: *curva de 90°, um tê de ferro fundido, vertedores, stop-logs e comportas.*

1.5 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

1.5.1 Considerações Iniciais

A ACV é uma metodologia de gestão ambiental voltado para produtos e serviços (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019). Essa metodologia de estudo evidencia os aspectos e os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde sua etapa inicial – obtenção de matérias-primas, produção, uso, tratamento, reciclagem e entre outros – até a sua disposição final (ABNT, 2014a), vide figura 7 abaixo. Vale ressaltar que, por meio desta metodologia, é permissível a identificação das atividades que ocasionam maiores contribuições nos impactos de produtos, para assim serem formuladas estratégias cabíveis para tomadas de decisões (PILZ; MACENO, 2020).

Figura 7 - Ciclo de Vida de um Produto



Fonte: Adaptado de Autossustentável (2015)

Essa metodologia que envolve a avaliação dos aspectos ambientais, bem como o potencial de impacto que está relacionado a um produto/serviço dar-se-á pela: definição do objetivo e escopo; a coleta do inventário de entradas e saídas relevantes do sistema em estudo; a avaliação do impacto ambiental associadas às entradas e saídas; e por fim, a

interpretação dos resultados obtidos pela análise do inventário e das etapas de avaliação de impacto pertencentes ao objetivo do estudo (LOPES, T., 2014)

O interesse ao utilizar esta metodologia tem crescido nos últimos anos por ser uma das técnicas mais completas para avaliação dos impactos potenciais em produtos. O setor da construção civil tem sido um eixo no qual esse estudo vem sendo bastante desenvolvido. Essa valia dar-se-á por meio de obtenções de quantificações e avaliações dos possíveis impactos gerados ao meio ambiente, durante o ciclo de vida dos materiais e das edificações (CALDAS; TOLEDO FILHO, 2019a). Entretanto, algumas observações devem ser consideradas, visto que em obras envolvendo engenharias (distinto de produtos) a vida útil dos produtos de construção se estende por anos, décadas ou séculos, ocasionando em incertezas (BUENO, 2016).

Um outro ponto a ser frisado é em relação a algumas limitações presentes na estrutura metodológica. Uma vez que em estudos práticos que exigem variados parâmetros (construtivos, transportes, consumo de água e energia e entre outros) se apresentam em diferentes regiões, ocasionando uma maior dificuldade para transpor os dados para o sítio a ser avaliado (PILZ; MACENO, 2020).

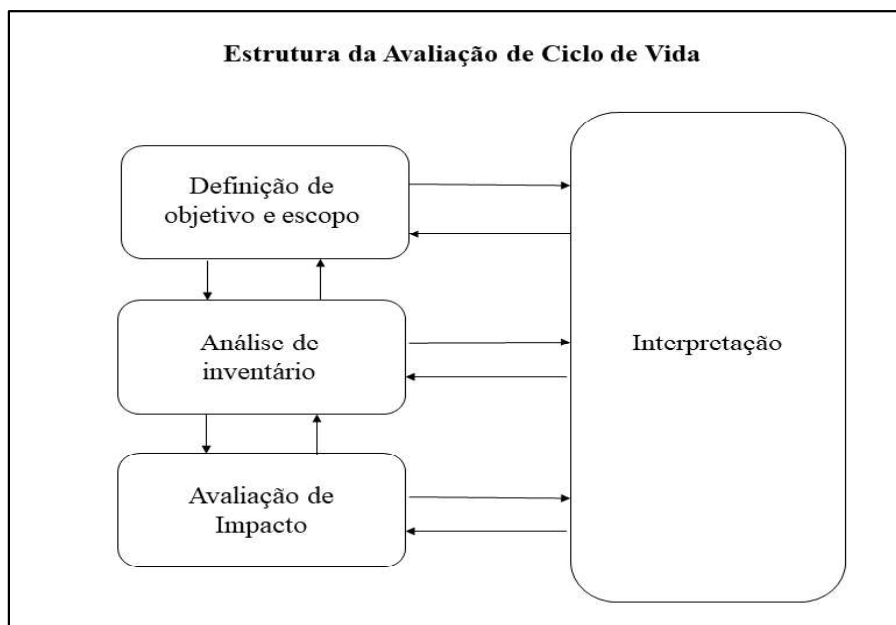
1.5.2 Estrutura Metodológica da ACV

Atualmente, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um método normatizado internacionalmente pela ISO 14040 e ISO 14044. No Brasil, essas normas são reconhecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio dos regulamentos NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, descritos abaixo:

- i. ABNT NBR - ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura (ABNT, 2014b);
- ii. ABNT NBR - ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações (ABNT, 2014a);

De acordo com as normas NBR ISO 14040 e 14044, um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) está dividido em quatro etapas: a definição de objetivo e escopo; a análise de inventário; a avaliação de impactos e a interpretação. A figura 8 abaixo, esquematiza essas etapas que serão descritas nas sessões seguintes.

Figura 8 - Fases de uma ACV



Fonte: (ABNT, 2014b)

:

1. Definição de Objetivo e Escopo:

A primeira fase da ACV, contempla a definição do objetivo e escopo do estudo. Nesta etapa, o objetivo e o escopo da ACV necessitam estar consistentes com a aplicação pretendida e bem definidos (ABNT, 2014b)

Os objetivos de uma ACV devem ser indicados: a aplicação pretendida; as razões pelas quais serão realizados os estudos; o público-alvo (a quem deve ser pretendido a comunicação dos resultados do estudo) e se há intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem expostos de forma pública (ABNT, 2014a).

Na definição de escopo, este deve estar bem definido para assegurar que seja compatível e suficiente para atender o objetivo do estudo (ABNT, 2014b). Dentre essas definições de escopo primordiais estão: as funções do sistema; a unidade funcional; o sistema de produto a ser estudado; as fronteiras do sistema de produto; procedimentos de alocação; tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada; requisito de dados; suposições; limitações; requisitos da qualidade dos dados iniciais; tipo de análise crítica, se aplicável; e, tipo e formato do relatório requerido para o estudo (ABNT, 2014b).

Um escopo de um estudo deve estar bem definido a fim de assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam suficientes e compatíveis para satisfazer o objetivo declarado (ABNT, 2014b). Já a unidade funcional é responsável pela quantificação das funções identificadas no produto e fornecer uma referência na qual as entradas e saídas estarão relacionadas (ABNT, 2014b)

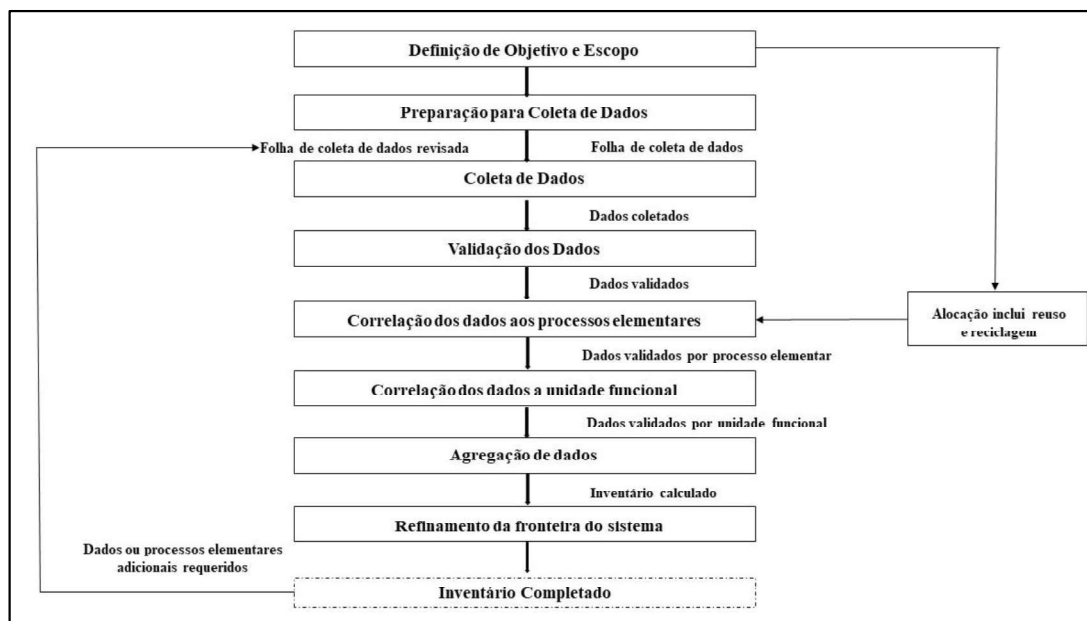
As fronteiras do sistema têm como objetivo especificar quais as etapas do ciclo que será efetuada a análise; desde o berço – extração de matérias-primas – até a etapa final, percorrendo todos os estágios considerando-os por completo ou de maneira isolada (SOARES; DE SOUZA; PEREIRA, 2006)

A definição de função de sistema é essencial para delimitar a fronteira do sistema, identificar as entradas e saídas relevantes e estabelecer a unidade funcional para análise. Essa definição também influencia na seleção de indicadores de impacto e no desenvolvimento de cenários de comparação (ABNT, 2014b). Em relação ao sistema de produto, este é definido como um sistema que inclui todas as atividades relacionadas à produção, uso e fim de vida de um produto, desde a solicitação de matérias-primas até a disposição final após o uso (ABNT, 2014a)

2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A análise de inventário do ciclo de vida envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculos utilizados para mensurar as entradas e saídas consideradas ao sistema de estudado (ABNT, 2014b). Vale ressaltar que esses dados são importantes e utilizados na etapa de avaliação do impacto do ciclo de vida (MORAIS; GOUVINHAS, 2009). Abaixo, na figura 9, ilustram-se os procedimentos para uma análise de inventário do ciclo de vida e, em seguida, uma descrição mais detalhada dessas etapas.

Figura 9 - Etapas da Análise de Inventário do Ciclo de Vida



Fonte: ABNT (2014a)

a) Coleta de dados

Para esta etapa, os dados a serem incluídos no inventário necessitam ser coletados para cada processo elementar indicado na fronteira do sistema. Além disso, suas fontes devem estar referenciadas e atender a requisitos de qualidade (ABNT, 2014a). Podem ser classificados sob títulos gerais que incluem:

- i. Entradas de energia, entradas de matéria-prima, entradas auxiliares, outras entradas físicas;
- ii. Produtos, co-produtos e resíduos;
- iii. Emissões atmosféricas, descargas para a água e solo;
- iv. Outros aspectos ambientais.

(ABNT, 2014b)

Os dados de um inventário podem ser distinguidos quanto a origem e nível de proximidade do produto em estudo. Quanto a origem podem ser classificados como: primários e secundários; e quanto a proximidade, em dados diretos (*foreground*) e dados indiretos (*background*) (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019).

b) Validação dos dados

Uma averiguação dos dados coletados é de extrema importância para fornecer qualidade a aplicação escolhida. Dessa maneira, esse processo de validação pode ser realizado por meio de balanço de massa, energia e/ou análises comparativas de fatores de emissão, isso devido a utilidade desses recursos para a validação de um processo elementar (ABNT, 2014a).

c) Correlação de dados a processos elementares e à unidade funcional

De acordo com a norma NBR ISO 14044(2014a), os fluxos de todos os processos elementares devem estar relacionados ao fluxo de referência. Portanto, compete que o cálculo resulte que todos os dados referentes a entrada e saída do sistema estejam referidos à unidade funcional.

d) Refinamento da fronteira do sistema

A natureza iterativa de uma ACV possibilita durante o estudo, modificações em sua estrutura. Dessa maneira, a fronteira inicial do sistema necessita ser sempre analisada com os critérios estabelecidos no escopo do estudo, bem como devem ser documentados todos os resultados de refinamento e análise de sensibilidade (ABNT, 2014a).

e) Alocação

Alguns itens devem ser considerados durante o processo de alocação:

- i. Entradas e saídas devem ser alocadas aos distintos produtos de acordo com critérios definidos de maneira clara, sendo documentados e explicados juntamente ao processo de alocação;
- ii. A soma das entradas e saídas de um processo elementar deverá ser igual à soma dessas entradas e saídas antes do processo de alocação;
- iii. Quando diversas possibilidades de alocações se apresentarem aplicáveis, deverá ser conduzida uma análise de sensibilidade.

(ABNT, 2014a)

Existem diversos procedimentos de alocações, em que os mais utilizados estão descritos abaixo, na figura 10, nos quais as separações dos fluxos são baseadas em:

Figura 10 - Métodos de Alocações mais usuais

| Métodos de Alocação | Bases |
|--|--|
| Massa | Massas (<i>kg</i>) dos produtos gerados no sistema |
| Energética | Valor energético (<i>MJ</i>) dos produtos gerados no sistema |
| Econômica | Valor econômico (\$) dos produtos gerados no sistema |
| Expansão do sistema seguido de substituição | Subtrai dos fluxos do sistema em estudo, os fluxos de um sistema de produção alternativo |

Fonte: Adaptado de (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019)

O ciclo de vida de um produto/serviço é constituído por inúmeros processos unitários, o que ocasiona uma maior coleta de dados que por sua vez, consumiria muito tempo e recursos, dificultando alguns estudos. Em virtude disso, utilizam-se alguns bancos de dados disponíveis que armazenam dados de inventários de diferentes processos específicos de um país de origem (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016). A figura 11 abaixo descreve cinco bases de dados internacionais muito utilizadas que auxiliam no processo de otimização do tempo de aplicação de uma ACV.

Figura 11 - Simplificação de 5 Bases de Dados utilizadas internacionalmente

| Base de Dados | Desenvolvedor | País de Origem | Fonte de Dados |
|----------------------|--|-----------------------|---|
| GaBi | PE Internacional | Alemanha | Dados Industriais/ Dados da Literatura/ Outros Bancos de Dados |
| Ecoinvent | Centro Suíço para Inventários de Ciclo de Vida | Suíça | Dados Industriais/ Dados da Literatura |

| | | | |
|-----------------|---|-----------|---|
| IBO | Instituto Austríaco para a Construção Saudável e Ecológica | Áustria | Dados Industriais/ Dados da Literatura/ Outros Bancos de Dados |
| PCP | Associação Japonesa para a Indústria | Japão | Dados Estatísticos/ Dados da Literatura |
| Sinergia | Instituto do Meio Ambiente Finladês | Finlândia | Dados Industriais/ Dados da Literatura |

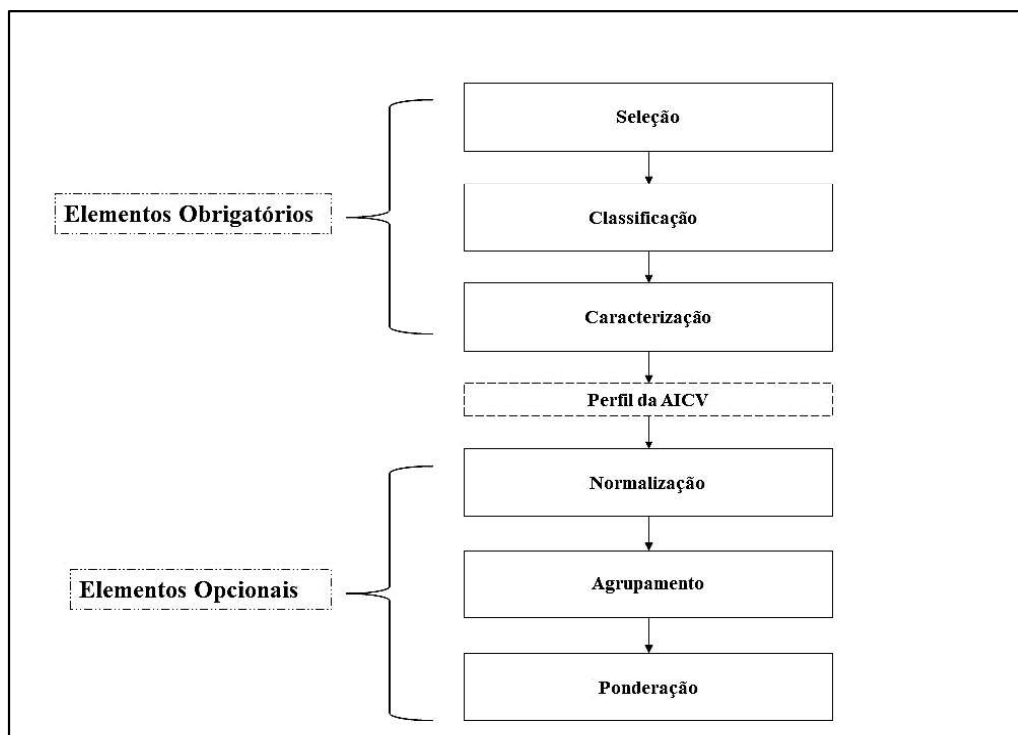
Fonte: Adaptado de (TAKANO *et al.*, 2014)

3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A terceira etapa da ACV tem com o propósito estudar a relevância dos impactos ambientais potenciais, aplicando os resultados do Inventário de Ciclo de Vida (ABNT, 2014b). É nessa etapa que os dados da ICV (aspectos ambientais) são convertidos em impactos ambientais quantificáveis (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019). De forma abrangente, essa etapa é a tentativa de compreensão dos impactos (MORAIS; GOUVINHAS, 2009).

A etapa de AICV é composta por elementos obrigatórios e opcionais. O objetivo dos elementos obrigatórios é de estabelecer a conversão dos resultados do ICV em resultados de indicador de categoria para distintas categorias de impacto; enquanto os opcionais são utilizados para normalizar, agrupar ou pesar os resultados do indicador e as técnicas que envolvem a análise da qualidade de dados (FERREIRA, 2018). A figura 12 abaixo ilustra os elementos constituintes das fases de uma AICV.

Figura 12 - Elementos da Fase de AICV



Fonte: ABNT (2014b)

a. Seleção (Obrigatória)

É constituído pela escolha das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelo de caracterização. O primeiro passo em uma AICV, corresponde a seleção de categorias de impacto na qual será considerada como item global e executadas durante a fase inicial do objetivo e escopo (GASC *et al.*, 2018). O processo seletivo de categorias de impacto deve representar um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto em estudo, considerando o objetivo e escopo (ABNT, 2014a).

Nessa etapa, os dados são agrupados em categorias específicas de acordo com um método de avaliação. Esse mecanismo é dividido em: métodos de categoria única ou multicategorias, sendo este último, classificado como: *midpoint* e *endpoint* (VIEIRA; CALMON; COELHO, 2016).

b. Classificação (Obrigatória)

Na etapa de classificação, as correlações dos resultados do ICV às categorias de impactos devem levar em consideração os seguintes aspectos:

- i. A correlação dos resultados do ICV que sejam exclusivos para uma categoria de impacto;
- ii. A identificação dos resultados do ICV que possam se correlacionar a mais de uma categoria de impacto, incluindo a distinção entre os mecanismos paralelos e a correlação a mecanismos seriais. (ABNT, 2014a)

c. Caracterização (Obrigatória)

Nessa fase, cada fluxo elementar deverá ser delegado a um valor referente ao seu respectivo potencial de dano ambiental naquela respectiva categoria de impacto (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019). O método de cálculo dos resultados deve ser devidamente identificado e documentado, incluindo a escolha dos valores e pressupostos utilizados. Portanto, o resultado final de uma caracterização é um inventário combinado por categorias de impacto, sendo avaliadas por um indicador numérico (SUDOE; IV, 2012).

d. Normalização (Opcional)

Segundo a NBR ISO 14044 (2014a) (ABNT, 2014a), a etapa de normalização transforma um resultado de indicador pela divisão deste por um valor de referência selecionado. Esses resultados por fatores normalizados expressam os resultados de impacto por área geográfica e tempo determinados, como, por exemplo, os impactos ambientais que um cidadão médio brasileiro gera em um ano (SUDOE; IV, 2012). Dessa forma, são identificadas as categorias de impacto mais significativas (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019).

e. Agrupamento (Opcional)

O agrupamento corresponde a reunião das categorias de impacto em um ou mais conjuntos, de acordo com o objetivo e o escopo estabelecidos e pode envolver a agregação e/ou a hierarquização (ABNT, 2014a). Por ser opcional, o agrupamento possui dois procedimentos possíveis:

- i. Agrupamento das categorias de impacto em uma base nominal - Exemplo: características tais como entradas e saídas ou escalas espaciais globais, regionais e locais;
- ii. Classificação das categorias de impacto de acordo com uma referida hierarquia – Exemplo: Alta, média ou baixa prioridade.

(ABNT, 2014a)

f. Ponderação (Opcional)

O processo de ponderação refere-se ao método no qual à cada categoria de impacto ambiental é dada uma significância, tornando-o um processo subjetivo (CHERUBINI; ZANGHELINI; SOUZA JR., 2019). Nessa etapa, os resultados dos indicadores normalizados das distintas categorias de impacto são modificados em unidades comuns, utilizando para isso fatores de ponderação numéricos baseados em valorizações subjetivas ou juízos de valor (SUDOE; IV, 2012). A ponderação apresenta dois procedimentos possíveis:

- i. Converter os resultados dos indicadores ou resultados normalizados com base em fatores de ponderação selecionados;
- ii. Agregar esses resultados convertidos dos indicadores ou resultados normalizados entre as diferentes categorias de impacto.

(ABNT, 2014a);

g. Análise adicional da qualidade dos dados da AICV

A norma ISO 14044(2014a) estabelece algumas técnicas que auxiliam na compreensão mais apurada a respeito da significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da AICV, descritos na figura 13:

Figura 13 - Técnicas de Análise Adicional da Qualidade dos Dados da AICV

| Técnica | Descrição |
|---------------------------------|--|
| Análise de Contribuição | Procedimento estatístico que identifica os dados de maior contribuição para o resultado do indicador. |
| Análise de Incerteza | Procedimento que determina como as incertezas nos dados pressupostos se propagam nos cálculos e como afetam a confiabilidade dos resultados da AICV. |
| Análise de Sensibilidade | Procedimento que determina como mudanças nos dados e nas escolhas metodológicas afetam os resultados da AICV. |

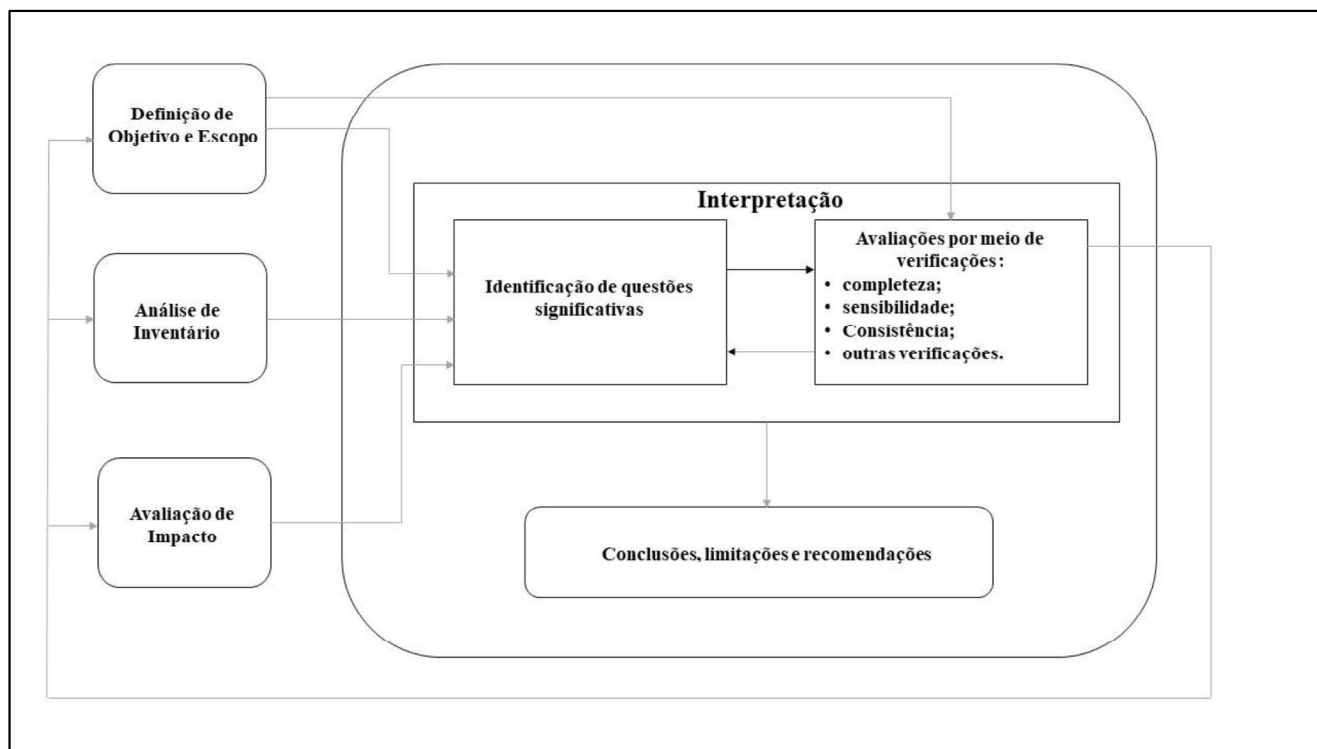
Fonte: ABNT (2014a)

4. Interpretação do Ciclo de Vida

A interpretação corresponde a quarta e última fase da avaliação do ciclo de vida. Os resultados nessa fase deverão ser consistentes com o objetivo e escopo e devem apresentar conclusões, limitações e recomendações (ABNT, 2014b). Essa etapa combina-se com as etapas anteriores da ACV, conforme, figura 14, e engloba três elementos fundamentais, conforme a NBR ISO 14044(2014a):

- i. A identificação das questões significativas com base nos resultados das etapas de ICV e AICV da ACV;
- ii. Uma avaliação de estudo que considera verificações de completeza, sensibilidade e consistência;
- iii. Conclusões, limitações e recomendações.

Figura 14 - Relacionamento dos Elementos da Fase de Interpretação com as outras Fases da ACV



Fonte: ABNT (2014a)

Ao longo dos anos, os pesquisadores têm desenvolvido variados métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida. Dessa maneira, diversos estudos foram realizados com o objetivo de harmonizar os métodos e para a identificação de práticas mais efetivas nos modelos de caracterização disponíveis. Entretanto, os métodos desenvolvidos consideram os impactos

ambientais globais ou relativos as regiões nos quais foram desenvolvidos (PIEKARSKI *et al.*, 2012). O método de avaliação de impacto escolhido para esta pesquisa foi o CML com característica de abrangência de aplicação global.

1.5.3 Aplicações de ACV em ETES na Etapa de Construção

Uma ETE, de maneira geral, contribui para a redução de impactos ambientais referentes à depleção de oxigênio, eutrofização, lançamentos de substâncias tóxicas nos corpos hídricos e também aos riscos causados à saúde humana (GUTIERREZ, 2014). Contudo, essas tecnologias também impactam o meio ambiente ao consumirem recursos naturais durante os processos de construção e operação das ETES (GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017).

O processo de expansão de uma ETE causa um aumento de carga em virtude do consumo adicional de recursos fósseis, adição de substâncias químicas e emissões de gases estufa ocasionando, portanto, em um impacto ambiental negativo que superaria o impacto positivo gerado pela redução da poluição em ambientes aquáticos (BAI *et al.*, 2017).

Apesar da maioria dos estudos negligenciar a etapa de construção, esta não pode ser desconsiderada, visto que são consideráveis os impactos ocasionados. Os estudos feitos por Risch *et al.*, (2015) relata que há uma parcela de contribuição em torno de 20% da fase construtiva em relação aos potenciais de aquecimento global e toxicidade humana. Morera *et al.*, (2017) realizou uma estimativa de impacto em que a construção contribui de 5% a 63%, de acordo com a categoria de impacto. Dessa maneira, a fim de fortalecer essas contribuições, estudos com inventários mais abrangentes são necessários de forma a obter maiores resultados a respeito dos impactos ocasionados nesta etapa da edificação (XUE *et al.*, 2019).

Em relação ao processo de construção de uma ETE, alguns itens podem ser explanados durante essa etapa, desde a utilização de recursos naturais como a água (para produção de aço, cimento e materiais cerâmicos) até o transporte. Dentre os materiais de construção, como por exemplo o cimento e a argamassa - que são muito utilizados em obras estruturais - ocasionam muitos impactos ambientais nas mudanças climáticas. Esses impactos estão relacionados aos gases do efeito estufa que são emitidos durante o processo de clínquerização (MAIA DE SOUZA *et al.*, 2016). O transporte de materiais de construção também está relacionado aos

impactos ambientais. Durante os deslocamentos de onde os materiais são produzidos, comercializados e transportados, ocorrem as emissões de gases que são provenientes da queima de combustível dos veículos (GUTIERREZ, 2014).

Diante disso, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido muito aplicada para quantificar os impactos ambientais associados à infraestrutura hídrica urbana, que incluem as estações de tratamento de efluentes, desempenhando um papel importante na avaliação da sustentabilidade ambiental de novas tecnologias e processos (COROMINAS *et al.*, 2020). De acordo com Bai *et al.*, (2017), é um método razoável para analisar os pesos associados a vários contribuintes dentro de uma determinada categoria ambiental.

Li *et al.*, (2013) realizaram uma ACV em uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) em Kunshan, China, utilizando o método CML Baseline 2000 e o software SimaPro 7.0. O objetivo da pesquisa foi avaliar os impactos ambientais associados ao tratamento de águas residuais em comparação com outros ETARs que utilizam diferentes processos avançados de tratamento. As fases de construção, operação e manutenção, depósito de lodo e transporte de produtos químicos para a ETAR foram considerados na análise. O uso de energia renovável, como energia eólica, foi proposto como uma forma de reduzir o impacto ambiental. O estudo destacou a importância da escolha do processo de tratamento, com impactos ambientais significativamente diferentes entre as três estimativas de usinas.

O estudo brasileiro desenvolvido por Osbell e Machado (2019) trouxe uma ACV aplicada em sistemas integrados de reator anaeróbio, Wetlands Construídos (WCs) de fluxo vertical/horizontal e Microalgas (MA). A análise de sensibilidade mostrou que a escolha do tipo de energia e do material utilizado na construção dos sistemas pode ter um grande impacto no desempenho ambiental. Com base nos resultados, foram identificados os maiores impactos na fase de construção (92,3%) relacionados à utilização de polietileno de alta densidade (32,8%), areia (27,2%) e policloreto de vinila (18,8%). Já na fase de operação o maior impacto foi a utilização de energia elétrica no sistema. Dessa forma, este estudo contribuiu para o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de águas residuárias em áreas sem acesso a sistemas convencionais de tratamento de esgoto.

Em relação a estudos mais recentes envolvendo a etapa de construção de ETEs, Moussavi *et al.*, (2021) discute a sustentabilidade ambiental de pequenas estações de tratamento de águas residuais (ETARs) em comunidades rurais com baixa capacidade de tratamento. Foram analisados 16 casos de pequenas ETARs em termos de impactos ambientais ao longo do

ciclo de vida, incluindo as fases de construção e operação. Além disso, a variabilidade nos impactos da construção decorre principalmente da infraestrutura não relacionada ao processo. A análise de sensibilidade do cenário descobriu que o impacto ambiental da construção é menor com a vida útil mais longa do projeto e que o fim da vida útil não tem grande influência na sustentabilidade ambiental das ETARs. Um outro fator concluído neste estudo é que a etapa de construção pode ser uma grande parcela do impacto ambiental total de uma pequena estação de tratamento de águas residuais.

Morera *et al.* (2020) realizou uma pesquisa significativa fornecendo inventários detalhados e abrangentes de 4 ETEs convencionais de pequeno a médio porte. Esse estudo apresentou estimativas de potenciais de impactos ambientais para construção, além de fornecer equações que auxiliam na estimativa de consumo de materiais que se encaixam nessa capacidade estudada (médio a grande porte).

Outros estudos, envolvendo a etapa de construção de estações de tratamento de efluentes, encontra-se discriminados na figura 15 abaixo:

Figura 15 - Alguns Estudos envolvendo a Etapa de Construção em ETEs

| Autor | Sistema | Método de Avaliação de Impacto | Categorias de Impacto | Etapas de Estudo |
|--|--|---------------------------------------|--|-------------------------|
| (CORBELLÁ; PUIGAGUT; GARFÍ, 2017) | Células de combustível microbianas (CCMs) implantadas em WC comparando três cenários | CML baseline | Esgotamento abiótico, Depleção abiótica, Combustíveis fósseis, Aquecimento global, Depleção da camada de ozônio, Acidificação, Eutrofização e Oxidação fotoquímica | Construção e Operação |
| (GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017) | Três alternativas para tratamento de esgoto em pequenas comunidades: sistema de lodos ativados, WC híbrido e sistema de lagoa de algas de alta taxa. | ReCipe | Depleção de Metal, Depleção fóssil, Mudanças climáticas, Depleção de ozônio, Acidificação, Eutrofização de água doce e Eutrofização marinha. | Construção e Operação |

| | | | | |
|----------------------------------|--|--|---|-----------------------|
| (LOPSIK, 2013) | Dois sistemas de pequena escala: WCs e sistema de lodos ativados com aeração prolongada. | Impact 2002+ e ReCipe | Toxicidade humana, Acidificação, Uso da terra, Depleção de ozônio, Uso de recursos não-renováveis, Eutrofização e Ecotoxicidade | Construção e Operação |
| (DE FEO; FERRARA, 2017) | Dois sistemas de pequena escala: WCs e sistema compacto de lodos ativados. | IPCC 2007 100 anos, Pegada Ecológica e ReCipe 2008 H | IPCC 2007 100 anos (com categoria de impacto, o aquecimento global com horizonte de tempo de 100 anos) Pegada Ecológica (com três categorias de impacto) e ReCipe 2008 H (18 categorias de impacto e 17 categorias de danos) | Construção e Operação |
| (LUTTERBECK et al., 2017) | Um sistema de tratamento de esgoto localizado em uma propriedade rural com: uma unidade anaeróbica, quatro Wcs e dois fotoreatores | ReCipe | Mudanças Climáticas, Depleção de Ozônio, Toxicidade Humana, Oxidantes Fotoquímicos, Formação de Material Particulado, Radiação Ionizante, Ecotoxicidade Terrestre, Eutrofização marinha, Ecotoxicidade marinha, Ocupação de terras agrícolas, Ocupação de terra urbana, Transformação da terra natural, Depleção de metal, Depleção fóssil, Depleção de água. | Construção e Operação |
| (LOPES, T., 2014) | ETE composta por reator UASB, seguido de WCs e desinfecção para as fases de construção e operação | CML 2000 | Depleção Abiótica, Aquecimento Global, Acidificação e Eutrofização | Construção e Operação |

Fonte: Adaptado Resende (2018)

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão introduzidos os conceitos referentes a pesquisa científica, bem como o delineamento da pesquisa proposta. Posteriormente, serão apresentadas as metodologias que são fundamentais para a composição da Avaliação do Ciclo de Vida de Construção da ETE

1.6 Pesquisa Científica

De forma conceitual, a pesquisa apresenta-se como um conjunto de medidas que devem obedecer a mecanismos já definidos por um método racional, de forma a obter-se resultados e respostas ao problema proposto (MENEZES *et al.*, 2019). Esse embasamento é de extrema importância para o rigor do estudo, além de ampliar as chances de êxito em relação aos resultados almejados.

A fim de classificar o estudo referente a ACV de Construção da ETE em questão, apresentam-se as seguintes considerações:

- i. Quanto ao objetivo: a pesquisa em questão apresenta-se como uma pesquisa explicativa que segundo Severino (2017), é aquela que registra e analisa os fenômenos estudados, identificando suas causas. Isso é realizado por meio de aplicações como: método experimental, matemático e pela interpretação de métodos qualitativos. De forma mais específica, essa pesquisa se manifesta como um estudo *ex-post-facto*, pois tem como principal característica a obtenção de dados após a ocorrência dos fatos (GERHARDH E SILVEIRA, 2009). Dessa maneira, o fato de o objeto de estudo encontrar-se já em estado operante, a análise da etapa construtiva da ETE enquadra-se como uma pesquisa *ex-post-facto*;
- ii. Quanto ao termo de classificação: o estudo se enquadra na categoria de pesquisa quantitativa, pois possui o objetivo de demonstrar de forma quantificada, a importância de todos os dados que serão coletados em uma análise (PROETTI, 2018);

Portanto, esta dissertação corresponde a um estudo referente à Estação de Tratamento de Esgoto, no município de São Luís - MA, na qual, serão aprofundados todos os aspectos que

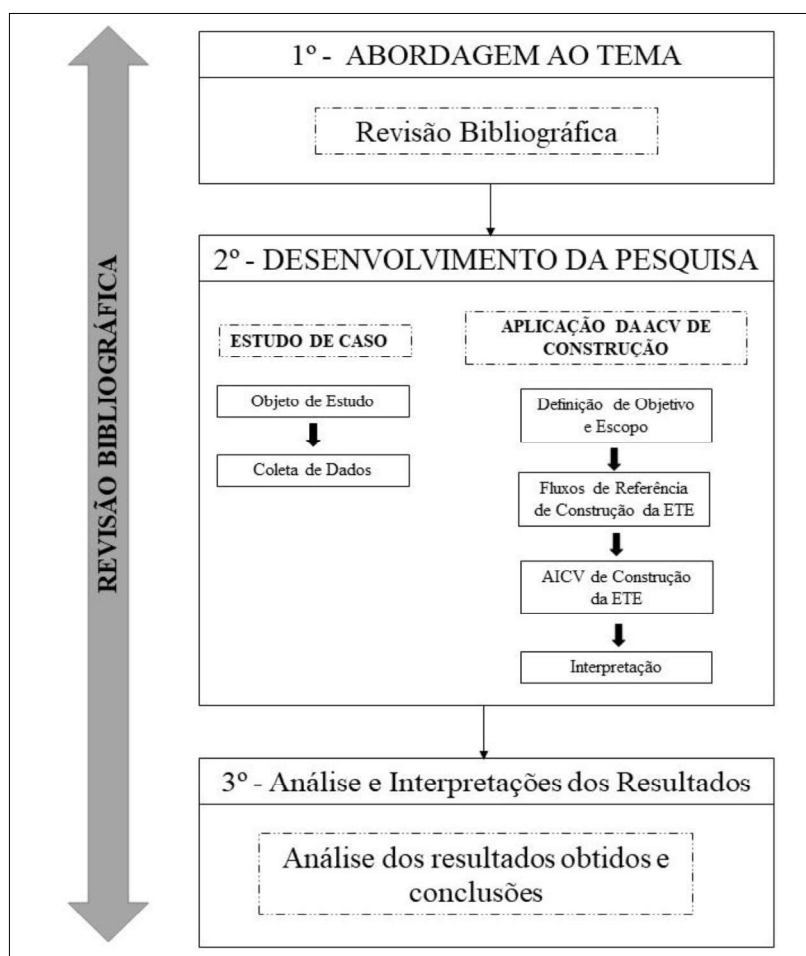
a torna única e característica em relação ao Inventário de Ciclo de Vida de Construção e as demais proposições. Para esse processo, foram levantados e tratados dados quantitativos obtidos da construção da ETE com intuito de alcançar os resultados previstos no estudo que, por sua vez, serão devidamente explanados e analisados.

1.7 Delineamento da Pesquisa

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foi realizado um estudo sobre os principais temas relacionados à proposta, uma descrição do objeto de estudo, uma coleta de dados para a confecção do levantamento dos fluxos de referência de construção e a análise dos resultados obtidas pela aplicação da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

O delineamento da pesquisa em questão está ilustrado abaixo, na figura 16, dividido em 3 etapas:

Figura 16 - Delineamento da Pesquisa



Fonte: Autor (2023)

1.7.1 Abordagem ao Tema

A priori, foi desenvolvida uma revisão bibliográfica abordando os assuntos mais relevantes para o embasamento da pesquisa, tais como: as estações de tratamento de efluentes e suas tipologias, a estação de tratamento do tipo lagoas de estabilização, os conceitos referentes a Avaliação do Ciclo de Vida, o processo de elaboração de um Inventário e a aplicação da ACV durante a fase construtiva de ETEs.

As principais fontes de informações foram adquiridas por meio de livros, artigos científicos, dissertações, teses, sites de pesquisa, normas e legislações. Com base nas datas de publicações dos documentos obtidos na revisão, priorizou-se os arquivos divulgados nos últimos 5 anos, a fim de obter informações mais atualizadas sobre o tema a ser estudado, mas sem descartar dados relevantes que estivessem fora desta faixa.

As bases de dados escolhidas para busca de artigos nesta pesquisa foram: Science Direct, Web of Science, Scopus, Springer e Scielo. Com a maior quantidade de informações na língua inglesa, utilizou-se palavras-chave nesse idioma, como por exemplo: *sewage treatment station; effluent treatment plant; wastewater treatment system plant; life cycle analysis; life cycle assessment; life cycle inventory; building life cycle assessment; life cycle assessment of the construction of a sewage treatment plant.*

1.7.2 Desenvolvimento da Pesquisa

A segunda etapa, que corresponde a realização da pesquisa, foi dividida entre o estudo de caso e a aplicação da ACV de construção.

1.7.2.1.1 Estudo de Caso

A etapa de estudo de caso engloba a tomada do objeto de estudo e a etapa que envolve a coleta de dados

1.7.2.1.1.1 Tomada do Objeto de Estudo: ETE do tipo Lagoa de Estabilização

O processo de tomada do objeto de estudo está localizado no município de São Luís, no Estado do Maranhão, vide figura 17 abaixo, nas coordenadas geográficas 2° 33' e 32'' e 44°

15° 56' W. Os dados relacionados ao projeto da Estação de Tratamento de Esgoto do tipo Lagoa de Estabilização, assim como as informações a respeito do processo construtivo, foram disponibilizados por meio trabalhos científicos similares ao tema (dispostos na revisão bibliográfica), dados de fornecedores de insumos e pela empresa responsável pela construção – que disponibilizou os orçamentos utilizados, o memorial descritivo e os projetos existentes.

Vale ressaltar que, dentre os dados fornecidos pela empresa, por problemas técnicos, a grande maioria do detalhamento referente à etapa de construção da ETE encontrou-se em falta. Portanto, trabalhou-se em base com o que foi disponibilizado, principalmente os quantitativos e informações do orçamento.

Figura 17 - Localização da ETE estudada

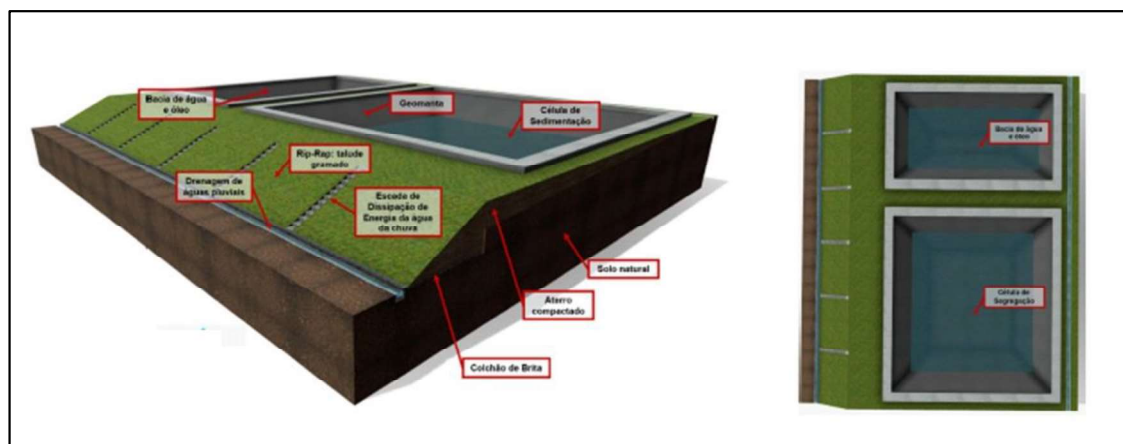


Fonte: Autor (2023)

A estação de tratamento de efluentes estudada foi dimensionada para atender uma vazão de 200 m³/dia de efluentes da empresa contratante e de terceiros em que o esgoto tratado será direcionado para umectação do terreno e infiltração. O sistema de tratamento de efluentes utiliza a tecnologia reator de leito móvel (MBBR) aliado ao processo de biodegração aeróbia, com aeração contínua dos reatores, por meio de compressões radiais. Esta estação opera seguindo três etapas de tratamento: pré-tratamento primário (gradeamento), tratamento secundário (anaeróbio, aeróbio e decantação) e terciário (desinfecção).

A ETE foi fabricada em alvenaria estrutural e impermeabilizada com manta geotêxtil impermeável. A etapa de construção das bacias de sanitização – que foi incluída no estudo - dentre as etapas de construção da ETE foi a que envolveu mais processos, tais quais: escavações, aterros, drenagem, impermeabilizações, construções de taludes, escadas de dissipações, implantação de gramado para proteção e toda a estrutura necessária para garantir a segurança da infraestrutura. A figura 18 abaixo apresenta um maior detalhamento.

Figura 18 - Detalhamento das bacias de sanitização



Fonte: Empresa construtora (2020)

A outra etapa considerada neste estudo foi a construção dos reatores que comportam a tecnologia MBBR. O reator é preenchido com as biomédias em 67% do seu volume (PURGARE, 2020) proporcionando otimizações nas dimensões projetadas e aumentando a eficiência do tratamento. O processo construtivo dos reatores é realizado em alvenaria estrutural, com blocos grauteados com concreto e aço na horizontal e vertical em todas as fiadas, proporcionando uma peça maciça.

O processo de impermeabilização dos reatores foi feito de maneira reforçada e seguindo as normas vigentes: chapiscos internos e externos seguidos de emboço; impermeabilização com manta de poliéster aplicada com fogo em toda sua área interna e ao fim, comprovando sua estanqueidade; e mais uma vez, revestida. Esse tipo de construção possui custos de implantações e instalações reduzidas e, também, uma maior resistência a sobrecargas hidráulicas e de cargas orgânicas.

A apropriação do objeto de estudo foi de grande importância para as etapas seguintes, visto que é necessária para o discernimento de todo o processo construtivo da ETE estudada. Além de ser fundamental para a escolha das informações a serem utilizadas, tais como os dados

que para esta pesquisa foram todos secundários e insumos a serem considerados, durante a etapa de construção.

1.7.2.1.1.2 Coleta de Dados

Para o estágio que engloba a coleta de dados, foram utilizados como suporte:

- a) Alguns estudos já disponibilizados acerca do tema, que foram obtidos por meio da revisão bibliográfica;
- b) Dados referentes ao objeto de estudo tais como projetos, planilhas orçamentárias, memoriais descritivos e acervos disponíveis referente a fase de construção. Estes dados foram fornecidos pela empresa responsável pela construção da Estação de Tratamento de Esgoto, alvo desta pesquisa;
- c) Dados obtidos de forma online correspondentes aos informativos que foram disponibilizados por fornecedores locais;
- d) As longitudes que estarão associadas ao transporte foram determinadas pelo aplicativo *Google Maps* e *Google Earth*;

1.7.2.1.2 Aplicação da ACV

A etapa de aplicação da ETE envolve o levantamento dos fluxos de referência de construção e a AICV de construção do objeto de estudo.

1.7.2.1.2.1 Definição de Objetivo e Escopo

Alicerçado a etapa anterior, foram desenvolvidas as fases relativas ao escopo, objetivo e requisitos do conjunto como: função do sistema, unidades funcionais, fronteiras do sistema em estudo e dentre outros itens que são exigidos pela primeira fase da norma ISO 14040 (ABNT, 2014b).

Vale ressaltar que a fase referente aos resíduos gerados na construção não foi considerada na pesquisa, bem como a operação, visto que o objetivo do estudo estará voltado apenas para a etapa construtiva.

1.7.2.1.2.2 Fluxos de Referência da etapa de construção da ETE

O levantamento dos fluxos de referências da etapa de construção da ETE em questão foi composto por todo o quantitativo de materiais que foram utilizados durante a etapa de construção.

Além disso, outros fatores serão considerados como os cálculos que deverão satisfazer a unidade funcional adotada, a identificação das longitudes referentes aos transportes utilizados e a exigência de combustível diesel que foi necessária durante o processo de edificação.

Disposto a isto, estes foram devidamente tabulados em planilhas do editor *Excel* e por fim, calculados e validados. Esses dados foram obtidos por meio de informações da construtora responsável, além dos dados que foram adquiridos de forma secundária por meio de fornecedores e fabricantes dos materiais de construção utilizados e as distâncias mensuradas pelo *Google Maps*, dados da base Ecoinvent 3 e inventários de construção de ETEs disponibilizados em Morera *et al.*, (2020).

1.7.2.1.2.2.1 Metodologias para o Cálculo dos Fluxos de Referências de Construção da ETE

A seguir, encontram-se os cálculos utilizados neste estudo para a obtenção das entradas devidamente correlacionadas para a elaboração da ACV de construção.

a) Cálculo dos Materiais:

Com base no orçamento fornecido pela empresa responsável pela edificação, pode-se selecionar os materiais que haviam sido utilizados durante as etapas de construção do reator e das bacias. A princípio, converteu-se todos os itens para a unidade de quilograma, visto que a correlação com a unidade funcional, mais a frente citada, estivesse em kg/m^3 .

Os itens correspondentes aos blocos de concreto, barras de aço, manta asfáltica, geomembrana e adesivos, foram disponibilizados pelos fornecedores. Enquanto o arame recozido, o cimento e os pregos foram obtidos pelo próprio orçamento.

Para encontrar a quantidade total de areia, madeira e brita, foi necessário realizar algumas conversões utilizando a densidade dos materiais.

O cálculo da areia em kg, utilizou-se a densidade média da mesma e multiplicou-se pela quantidade em m^3 fornecidos no orçamento. A densidade adotada para a areia foi de 1.800

kg/m³ (FGV, 2020). O mesmo foi feito para encontrar a quantidade total de brita, adotando-se a densidade de 1.384 kg/m³ e multiplicando pelo volume total (LUZ, 2018)

Para o cálculo da madeira, calculou-se o volume da mesma com base no orçamento e adotou-se uma espessura de 0,035 cm. Considerando uma umidade de 15%, foi utilizado a densidade de 480 kg/m³. Multiplicando-se pela quantidade total de tábuas, obteve-se o valor total em kg de madeira utilizada (IPT, 2023)

A grama e a terra preta utilizadas também exigiram conversões. Para a grama, considerou-se 20kg/m² (ITOGRASS, 2022) e para a terra preta, 1,2kg/m³ (BAURU, 2022). Dispostos desses dados, multiplicou-se pelo valor total em m² e m³ existentes no orçamento.

Os demais itens considerados foram obtidos por meio de catálogos e sites online, no qual obteve-se seu peso por unidade, que foram multiplicados por suas quantidades. Vale ressaltar que os itens correspondentes aos tubos e conexões foram obtidos em gramas, sendo transformados em kg ao final. Todos os materiais utilizados para esta pesquisa que foram convertidos em quilogramas estão apresentados no apêndice 01.

Após todos os itens serem convertidos para unidade de massa, agrupou-se os materiais de acordo as mesmas composições e classes a fim de facilitar o entendimento e a inserção dos dados no software de modelagem da ACV. Dessa maneira, para cada grupo, somou-se a quantidade de cada item correspondente de forma a obter o valor total em quilogramas. A tabela 2 abaixo apresenta todos os materiais convertidos em kg e agrupados.

Tabela 2 - Materiais utilizados na etapa de construção em kg

| Entradas - Materiais | Total Kg |
|-----------------------------|-----------------|
| Geomembrana | 1.875 kg |
| PVC | 34,73 kg |
| Registros | 60,000627 kg |
| Cola | 0,017 kg |
| Caixa Separadora | 60 kg |
| Caixas pré-moldadas | 296 kg |
| Grama | 5.100 kg |
| Terra Preta | 28,8 kg |
| Cimento | 6.000 kg |
| Areia | 21.600 kg |
| Brita | 16.608 kg |
| Pregos | 4 kg |
| Madeira | 136,08 kg |
| Blocos | 11.850 kg |

| | |
|---------------------|-----------|
| Aço | 423,80 kg |
| Manta Asfáltica | 450 kg |
| Fonte: Autor (2023) | |

Uma ressalva que, durante a inserção dos dados no software Simapro, os itens referentes a madeira e as caixas pré-moldadas passaram por mais uma conversão, visto que foram inseridas em m^3/m^3 . Dessa forma, para a madeira dividiu-se o valor total em kg por 480 kg (valor da densidade da madeira) e a caixa pré-moldada, por 2.500 kg, valor da densidade do concreto (LUZ, 2018)

Ao final, todos os itens com seus quantitativos totais foram correlacionados para unidade funcional do sistema.

b) Cálculo dos Combustíveis:

Durante a etapa de construção foram utilizados alguns maquinários. Diante disso, o consumo de combustível para cada um destes equipamentos foi considerado para a elaboração do levantamento. O cálculo foi realizado para o consumo de diesel e gasolina. Dessa maneira, foram feitas as devidas conversões, visto que as inserções desses dados no software seriam também em quilogramas. As informações fornecidas para os equipamentos utilizados foram bem generalistas de forma a obter maiores especificações para a realizações dos cálculos por meio de dados online.

Os maquinários utilizados foram caminhões basculantes de 6 m^3 e 10 m^3 , uma retroescavadeira e um aparelho sapo compactador. Apenas o equipamento de sapo compactador utiliza como combustível a gasolina, os demais, o diesel. Utilizou-se como informação base que as operações com estes equipamentos foram por 3 dias de trabalho com 7 horas trabalhadas a cada dia (de acordo com a empresa construtora).

O primeiro passo foi a identificação dos equipamentos de maneira a obter o consumo em L/h. Com esta informação, obtém-se o consumo de litros em sete horas, por meio da multiplicação deste consumo. Este resultado em litros equivale a um dia de operação, que multiplicado por 3 – equivalente ao total de dias trabalhados – atingindo o consumo total em litros para cada equipamento.

O equipamento referente ao sapo compactador e o veículo de retroescavadeira, o valor do consumo (L/H) foi fornecido por meio de dados online. Enquanto os caminhões basculantes de 6 m^3 e 10 m^3 , este valor foi obtido por meio de conversões. O cálculo realizado para encontrar

o consumo de litros em cada hora foi feito por meio do consumo horário. Esse cálculo é utilizado para fornecer o cálculo da média de consumo de diesel por hora (NUNTEC, 2019) e consiste em multiplicar o consumo médio, o fator de potência e a potência do motor do veículo:

Sendo:

- Consumo médio: 0,15 l/CV. H;
- Fator de potência: 0,55 ou 55 %;
- Potência do motor: X cv.

$$\text{*Equação 1 - Consumo horário} = 0,15 * 0,55 * x$$

A potência do caminhão basculante de 10 m³ por ser um modelo ATEGO 2423 é de 230 cv, portanto seu consumo horário, de acordo com a equação 1 é de 18,97 l/h.

$$\text{Consumo horário} = 0,15 * 0,55 * 230$$

$$\text{Consumo horário} = 18,97 \text{ l/h}$$

Já a potência do caminhão basculante de 6 m³ por ser um modelo MB 1314 é de 136 cv, portanto seu consumo horário, de acordo com a equação 1 é de 11,22 l/h.

$$\text{Consumo horário} = 0,15 * 0,55 * 136$$

$$\text{Consumo horário} = 11,22 \text{ l/h}$$

Dispostos dos valores em l/h, repetiu-se o mesmo procedimento realizado para a retroescavadeira e o sapo compactador afim de encontrar o total de litros durante a jornada estabelecida. O valor total em litros para cada maquinário, encontra-se na tabela 3 abaixo:

Tabela 3 - Consumo em litros dos maquinários utilizados na etapa de construção da ETE

| ITEM | MODELO | CONSUMO | CONSUMO TOTAL L | FONTE |
|---|---------------------|-----------|-----------------|-------|
| Basculante 6 m ³ - Reator e Bacias | MB 1314 | 11,22 L/h | 235,62 L | * |
| Retroescavadeira - Reator | CAT 416 E 75 T | 8L/h | 168 L | ** |
| Basculante 10 m ³ - Bacias | Ford Cargo 2423 6x2 | 18,97 L/h | 398,37 L | *** |
| Sapo Compactador - Bacias | Vipart | 1L/h | 21 L | **** |

https://www.compremoto.com.br/produto/mb-1314-toco-cacamba-basculante-6m-1988-cacamba_MLB2152269073*

https://mpterrapienagem.com.br/produto/retroescavadeira-cat-416-e/**

https://www.fordcaminhoes.com.br/storage/pdfs/c-2423-6x2especificacoes-tecnicas.pdf***

http://www.biglok.com.br/produto-detalle.php?id=13****

Fonte: Autor (2023)

Em seguida, somou-se as quantidades totais em litros para cada tipo de combustível. Entretanto, o software utilizado na modelagem utiliza as entradas em kg, portanto converteu-se os resultados, obedecendo cada tipo de combustível e seus respectivos pesos – kg/l. No qual 1 L de diesel equivale a 0,885 kg (CONVERSOR, 2022) e 1 L de gasolina equivale a 0,737 kg (CONVERSOR, 2022). O resultado está representado na tabela 4, abaixo:

Tabela 4 - Total de combustível utilizado no maquinário em kg

| COMBUSTÍVEL | L | Kg |
|--------------------|----------|--------------|
| Diesel L | 801,99 L | 709,76115 kg |
| Gasolina L | 21 L | 15,477 kg |

Fonte: Autor (2023)

Ao final, os quantitativos totais em kg de diesel e gasolina utilizados foram correlacionados para a unidade funcional do sistema.

c) Cálculo dos Transportes de Materiais:

A outra entrada considerada para o estudo foi referente ao transporte de materiais utilizados durante a etapa de construção. Pela ausência de dados correspondentes aos tipos de veículos e localidades de alguns fornecedores, esta pesquisa baseou-se por transportes que pudessem ser aplicados a estas atividades, bem como pesquisou fornecedores locais e nacionais que possuísem os materiais nos quais as distâncias não foram informadas pela empresa construtora. Outra medida adotada para estes cálculos foi de que o transporte foi realizado apenas para uma viagem, ou seja, do fornecedor ao canteiro de obras.

Pelas características dos veículos selecionados, agrupou-se os materiais por eles transportados. A tabela 5 abaixo, tem-se os veículos adotados no estudo, bem como os materiais de construção que foram utilizados na obra de saneamento.

Tabela 5 - Veículos adotados no transporte de materiais

| VEÍCULO | MATERIAIS TRANSPORTADOS | FONTE |
|--|--|--|
| Caminhão Basculante 20 m ³ | Areia, Cimento e Brita | Coletado pela autora com base na atividade |
| Strada Hard Working 1.4.C.S | Pregos, PVC, Registros, Cola e Terra Preta | Coletado pela autora com base na empresa |
| Caminhão Toco carroceria de madeira VW/12.170 BT | Aço, Madeira, Manta Asfáltica, Grama e Caixas pré-moldadas | Coletado pela autora com base na atividade |
| Caminhão Munk Mercedes 1113 IDS-2336 | Blocos de Concreto | Coletado pela autora com base na atividade |
| Caminhão Atego 2430 | Geomanta e Caixa Separadora | Coletado pela autora com base na atividade |

Fonte: Autor (2023)

Após a definição do tipo de veículo utilizado, o passo seguinte foi mensurar a distância percorrida entre o fornecedor até a ETE. Essas distâncias percorridas encontram-se nos apêndices 2 a 8 e foram adquiridas por meio do google maps.

As entradas referentes aos transportes ao serem inseridas no software Simapro obedecem a algumas particularidades baseadas nos padrões EURO. Em busca de reduzir as emissões de poluentes no meio ambiente, em veículos pesados, busca-se a redução de emissão de gases. Esse sistema corresponde a um conjunto de normas que regulamentam a emissão de poluentes para motores a diesel (TEXACO, 2021). Dessa maneira, classificou-se cada tipo de veículo utilizado baseando-se nesse sistema - por meio da categoria do veículo e pelo ano do modelo do transporte.

Para o software de modelagem, as entradas de transportes, além de obedecer ao padrão EURO, devem estar na unidade tonelada por km (t.km). Dessa maneira, para cada veículo, cada peso do material transportado – convertido em toneladas - foi multiplicado pela distância percorrida. Ao final, somou-se o total em t.km para cada tipo de transporte. A tabela 6 abaixo, estão apresentados os resultados finais em t.km e as classificações nos padrões EURO. É importante ressaltar que todas as operações realizadas para cada tipo veículo e seus respectivos materiais transportados, encontram-se no apêndice 09.

Tabela 6 - Classificação dos veículos utilizados para transporte no padrão EURO e valor total em t.km

| VEÍCULO | PADRÃO EURO | TOTAL t.km |
|---|--------------------|-----------------------|
| Caminhão Basculante 20 m ³ | <i>EURO 3</i> | 1.234,5216 t.km |
| Strada Hard Working 1.4.C.S | <i>EURO 5</i> | 1,846314327 t.km |
| Caminhão Toco carroceria de madeira VW/12.170 BT | <i>EURO 3</i> | 109,599992 t.km |
| Caminhão Munk Mercedes 1113 IDS-2336 | <i>EURO 1</i> | 92,43 t.km |
| Caminhão Atego 2430 | <i>EURO 6</i> | 5.371,172 t.km |

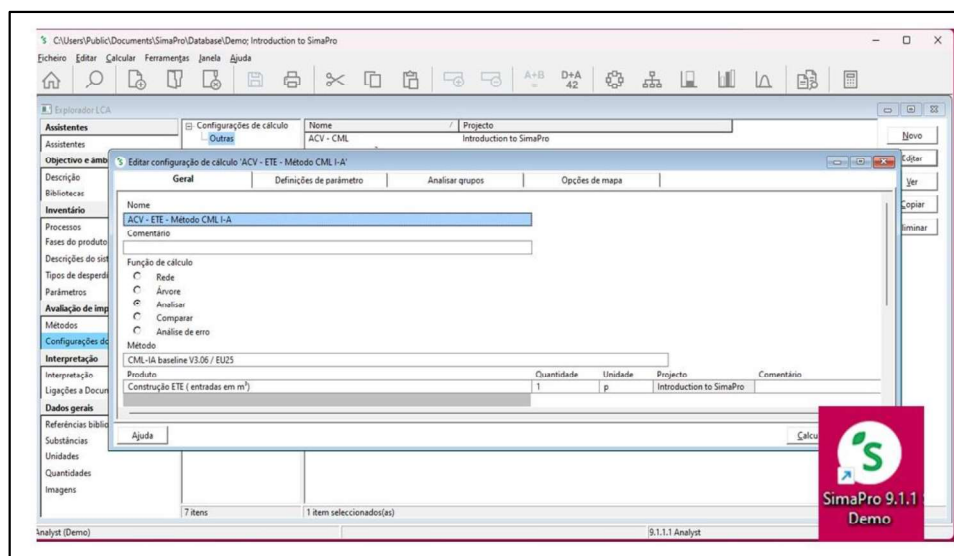
Fonte: Autor (2023)

Ao final, os quantitativos totais em t.km de cada veículo foram correlacionados para a unidade funcional do sistema.

1.7.2.1.2.3 AICV

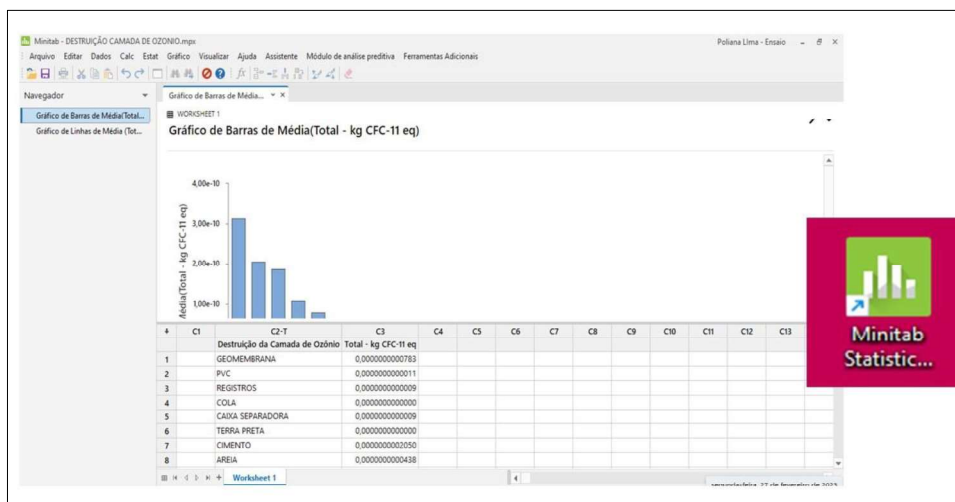
Para esta etapa, os dados obtidos no levantamento dos fluxos de referências foram inseridos com suas devidas conversões no software SimaPro - versão 9.11 - utilizando o método de avaliação de impacto midpoint CML – IA baseline v3.06. Os resultados numéricos obtidos foram tabulados utilizando o software Minitab *Statistical* para facilitar as interpretações. A figura 19 e 20 abaixo, ilustram os softwares utilizados na pesquisa.

Figura 19 - Interface do software Simapro versão 9.11



Fonte: Autor (2023)

Figura 20 - Interface do software Minitab Statistical



Fonte: Autor (2023)

1.7.3 Análise e Interpretações dos Resultados

A terceira e última etapa da pesquisa contempla a análise e interpretações dos resultados obtidos nos levantamentos dos Fluxos de Referência de Construção e no estudo da AICV de Construção da ETE obtidos da segunda etapa, que corresponde a realização da pesquisa. Esse tópico foi analisado em duas partes:

a) Análise e Interpretações dos Fluxos de Referência:

Essa etapa do estudo referiu-se às análises e interpretações dos resultados obtidos nos fluxos de referências correlacionados. Para os resultados de cada material utilizado na fase construtiva houve uma análise pautada à unidade funcional do sistema e uma análise junto a matriz de dados Pedigree. As fontes de dados na Matriz Pedigree, são avaliadas de acordo com as cinco características independentes (*confiabilidade, completude, correlação temporal, correlação geográfica e maior correlação tecnológica*), em que cada característica é dividida em 5 níveis de qualidade, sendo 1 o maior grau de qualidade e 5, o menor (WEIDEMA *et al.*, 2013). Essa análise é utilizada para dados primários, entretanto fez-se uma adaptação para os dados obtidos no levantamento dos fluxos de referência.

b) Análise e Interpretações do AICV de Construção:

E por fim, essa etapa do estudo refere-se às análises e interpretações dos resultados da AICV de construção em relação a análise de contribuição. Os dados foram interpretados por meio dos gráficos e tabelas gerados, analisando-se junto a cada categoria de impacto escolhida do método CML. Esta fase é de extrema importância, visto que para cada categoria de impacto escolhida, identificou-se os itens de entrada que obtiveram maior contribuição. Dessa maneira, pode-se de uma forma geral analisar os reais impactos gerados na etapa de construção da ETE estudada.

ESTRUTURA DA ACV

Neste capítulo serão apresentados a estrutura da ACV de construção em relação ao objeto de estudo

1.8 Definição de Objetivo e Escopo

1.8.1 Objetivo da ACV

a) Aplicação pretendida:

A aplicação pretendida refere-se às avaliações de impactos que serão geradas durante a etapa de construção da ETE em estudo definidas na fronteira do sistema, considerando o seu tempo de vida útil de 20 anos.

b) Razões para a execução do estudo:

A razão pelo qual o estudo está sendo desenvolvido é devido a escassez de dados referentes aos impactos ambientais que são gerados durante a etapa de construção de uma ETE, visto que apenas as etapas de destino e manejo de efluentes são normatizadas por Lei. Assim, um estudo mais detalhado sobre os reais impactos resultados na fase de construção de estações de tratamento de esgotos, torna-se necessário e enriquecedor para o banco de dados de estudos relativos a essa área e para construções futuras mais sustentáveis.

c) Público-alvo:

O público-alvo engloba a classe de engenharia que trabalha ou desenvolve pesquisas relacionadas à construção de estações de tratamento de esgoto e os impactos que são gerados durante essa etapa no meio ambiente

1.8.2 Escopo da ACV

a) Sistema de Produto

O sistema de produto corresponde ao conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo

de vida de um produto (ABNT, 2014b). O sistema estudado foi uma estação de tratamento de esgotos em que o efluente tratado contempla as etapas de pré-tratamento primário (gradeamento), secundário (tratamento anaeróbio, aeróbio e decantação) e terciário – desinfecção.

As fases consideradas foram correspondentes a etapa de construção da ETE em estudo, contemplando as etapas de construção dos reatores aeróbios e das bacias de sanitização. Vale ressaltar que não foram considerados no sistema de produto as etapas: de demolição, fabricação dos materiais utilizados e a etapa de resíduos da construção. A ilustração mais detalhada dessas etapas encontra-se no item *fronteira do sistema*.

b) Funções do Sistema

A função da ETE tem como objetivo, condicionar de forma adequada o efluente produzido a partir das contribuições do esgoto do empreendimento, por meio da remoção dos constituintes indesejáveis, e proteger diretamente o meio ambiente e a qualidade de vida da população residente. O sistema isolado de coleta, tratamento e disposição final dos esgotos sanitários atende a Lei Federal CONAMA 430/11

c) Unidade Funcional

Um dos principais objetivos de uma unidade funcional é fornecer uma referência na qual os dados de entrada e saída sejam normalizados de forma matemática (ABNT, 2014a). A unidade funcional adotada nesta pesquisa foi de 1 m³ de efluente tratado durante o período de 20 anos de operação da ETE. A escolha da unidade funcional baseada em m³ de efluente tratado deve-se a alguns estudos referentes à ACV aplicadas em estações de tratamento de efluentes (GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017)(LOPES, T., 2014)

A correlação de todas as entradas dos fluxos de referência de construção com a unidade funcional adotada foi baseada no cálculo do volume total de efluente tratado na ETE durante o período de 20 anos de operação (Tabela 7). Após esse processo, dividiu-se os quantitativos totais das entradas do levantamento pelo volume total de esgoto tratado de 1.459.416 m³.

Em virtude deste estudo não ser um estudo comparativo, considerou-se que a unidade funcional seria igual ao fluxo de referência.

Tabela 7 - Volume total de esgoto tratado durante 20 anos de operação da ETE

| Dados | Quantidades |
|---|--------------------------|
| Vazão Média da ETE | 8,33 m ³ /h |
| Vida útil adotada | 20 anos |
| Volume Total de Efluente Tratado em 20 anos | 1.459.416 m ³ |

Fonte: Autora (2023)

d) Fronteira do Sistema

A fronteira do sistema deve determinar quais processos elementares devem ser incluídos na ACV(ABNT, 2014a). Para este estudo, a fronteira do sistema limitou-se ao processo de construção da ETE, considerando os quantitativos de entradas e saídas para a fase construtiva.

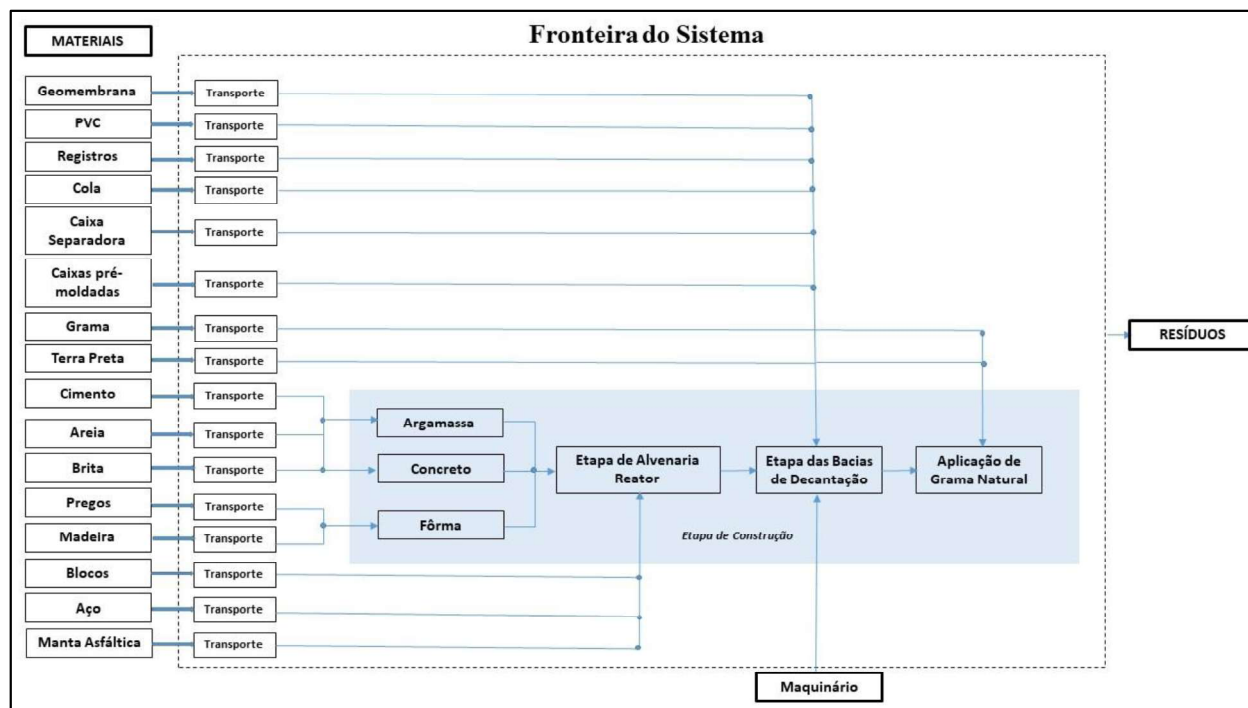
Em relação a fronteira do sistema em estudo, ilustrada na figura 23 abaixo, foram considerados os materiais de construções utilizados, bem como o transporte deles até o canteiro de obras da estação de tratamento de efluentes; a etapa de construção dos reatores e das bacias sanitizadoras e, o maquinário utilizado durante a etapa construtiva.

Portanto, o foco da fronteira está relacionado aos aspectos referentes aos materiais de construção utilizados na etapa construtiva, as emissões atmosféricas e tempo de vida útil considerado para a ETE.

Vale ressaltar que, na fronteira do sistema acima, não foram consideradas a geração de efluentes, a etapa de operação da ETE, a rede coletora de esgotos, a etapa de demolição, os resíduos gerados na construção em estudo (apesar de ilustrados na figura 21), o processo de fabricação de cada material de construção utilizados e o consumo de água e energia elétrica.

Embora a maioria dos dados obtidos não possuam registros fidedignos em relação aos fornecedores dos materiais, distâncias percorridas até o canteiro de obras e a tipologia dos veículos; devido a estação de tratamento já estar em funcionamento e a maioria dos dados encontrarem-se ausentes, a etapa de transporte dos materiais utilizados foi considerada no estudo.

Figura 21 - Fronteira do Sistema



Fonte: Autor (2023)

e) Procedimentos de Alocação

A alocação corresponde na repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outros sistemas (ABNT, 2014b). Portanto, utiliza-se como forma de dividir a carga de um processo entre os co-produtos que são gerados. Em razão dos pontos de distribuição dos impactos dos dados secundários passarem pelo tratamento na Ecoinvent, não foi preciso executar o procedimento de alocação.

f) Metodologias para Avaliação de Impactos

Para a aplicabilidade da ACV utilizou-se o software Simapro 9.1.1 versão Demo. Este software é de extrema importância, visto que corresponde a uma ferramenta de coleta de dados e análise do desempenho ambiental de produtos e serviços, obedecendo as instruções da ISO 14040 (ACVBRASIL, 2023). Esse sistema permite o acesso a um elevado banco de dados e métodos de avaliações de impacto.

O método escolhido para este estudo foi o CML – IA baseline v3.06 empregados nas seguintes categorias de impacto: depleção abiótica (combustíveis fósseis), aquecimento global,

destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática água marinha, acidificação e eutrofização.

A escolha de um método de avaliação de impacto deve levar em consideração a análise dos quesitos ambientais que serão pertinentes para o ciclo de vida do produto estudado com os propósitos e resultados esperados (CAMPOLINA; SIGRIST; MORIS, 2015). A deliberação do método CML como critério para a avaliação de impacto do estudo, deu-se pela seleção de métodos recomendados para serem aplicados no Brasil, no qual o CML está incluso e, por ser um método de abrangência global para o escopo de categorias de impactos (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015) . Além disto, alguns trabalhos já desenvolvidos voltados para estações de tratamento de efluentes e ACV, utilizaram deste método avaliativo

g) Requisitos de Dados

Como já explanado, este estudo contempla dados de entrada secundários. A obtenção desses itens foi por meio de estudos anteriores, acervos disponibilizados pela empresa responsável pela ETE, dados online de fornecedores e/ou obtenção de informativos, normas, distâncias percorridas e especificações técnicas.

Com o intuito de obter informações de caráter qualitativo para os resultados dos fluxos de referência de construção, foi feita uma adaptação utilizando a Matriz Pedigree, estabelecida na figura 22 abaixo, para os dados de entrada coletados.

Figura 22 - Matriz Pedigree utilizada para avaliar a qualidade de dados dos Fluxos de Referência de construção em estudo

| Pontuação do Indicador | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|--|---|---|--|--|
| Confiabilidade | Dados verificados com base em medições | Dados verificados parcialmente baseados em suposições ou dados não verificados com base em medições | Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas | Estimativa qualificada (ex: por expert industrial) | Estimativa não qualificada |
| Completeness | Dados representativos de todos os locais | Dados representativos de >50% dos sites relevantes | Dados representativos de apenas alguns sites | Dados representativos de apenas um site relevante | Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de |

| | | | | | |
|--|---|---|---|--|--|
| | relevantes para o mercado considerados, durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais | para o mercado considerado, durante um período adequado para uniformizar as flutuações normais | (<<50%) relevantes para o mercado considerado ou >50 % dos sites, mas de períodos mais curtos | para o mercado considerado ou de alguns sites, mas de períodos mais curtos | sites e de períodos mais curtos |
| Correlação Temporal | Menos de 3 anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados | Menos de 6 anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados | Menos de 10 anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados | Menos de 15 anos de diferença em relação ao período do conjunto de dados | Idade dos dados desconhecidos ou mais de 15 anos de diferença em relação ao período do dataset |
| Correlação Geográfica | Dados da área em estudo | Dados médios de uma área maior na qual a área em estudo está incluída | Dados da área com condições de produção semelhantes | Dados da área com condições de produção ligeiramente semelhantes | Dados de áreas desconhecidas ou distintamente diferentes |
| Maior correlação tecnológica | Dados de empresas, processos e materiais em estudo | Dados de processos e materiais em estudo (ou seja, tecnologia idêntica), mas de empresas diferentes | Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes tecnologias | Dados sobre processo ou materiais relacionados | Dados sobre processos relacionados em escala laboratorial ou de diferentes tecnologias |
| PONTUAÇÕES ATRIBUÍDAS AOS DADOS SECUNDÁRIOS | | | | | |
| Materiais utilizados na construção | | Materiais utilizados na construção | | Consumo de combustível - diesel e gasolina | |
| Geomembrana | 5,4,1,3,3 | Areia | 3,4,1,3,4 | Transporte de materiais e maquinário | 5,4,1,4,4 |
| Tubos | 5,4,1,3,3 | Brita | 3,4,1,3,4 | | |
| Conexões | 5,4,1,3,3 | Pregos | 2,4,1,1,1 | | |
| Cola | 5,4,1,3,3 | Madeira | 3,4,1,3,4 | | |
| Caixa Separadora | 5,4,1,3,3 | Blocos Estruturais | 2,4,1,1,1 | | |
| Gramma | 5,4,1,3,3 | Aço | 2,4,1,1,1 | | |
| Terra Preta | 5,4,1,3,3 | Manta Asfáltica | 2,4,1,1,1 | | |
| Cimento | 2,4,1,1,1 | | | | |

Fonte: Adaptado de (WEIDEMA *et al.*, 2013)

A análise de incerteza provenientes dos frutos dos resultados obtidos na figura 22 da Matriz Pedigree juntamente com a análise estatística de Monte Carlo, não foi utilizada para a

correção dos indicadores, pois este estudo não retratou a análise de incertezas. Portanto, a matriz foi empregada apenas para a aquisição elementos qualitativos.

Em relação aos resultados obtidos, observou-se que a maioria dos materiais relacionados a etapa da construção do reator, apresentaram pontuações mais elevadas para a completude, como por exemplo: o cimento, aço, blocos estruturais e mantas (pontuação 2,4,1,1,1). Esta pontuação deve-se as informações coletadas terem sido disponibilizadas pelos fornecedores contratados durante a etapa construtiva.

Vale frisar que não foi possível realizar medições durante a fase de construção da ETE estudada, visto que a obra já se encontra concluída durante a realização deste estudo. Além desse fator, a maioria dos itens foram obtidos apenas de quantitativos numéricos disponibilizados em orçamentos; por estimativa e embasamentos referentes a situações semelhantes.

Portanto, esses e mais outros fatores refletiram-se no nível de confiabilidade e correlação geográfica de alguns dados, tais como os itens de tubos, conexões, geomembrana, cola, caixa separadora, grama, terra preta, areia, madeira e transportes – que apresentaram pontuações maiores, que, por sua vez, de menor confiabilidade.

h) Requisitos quanto a Qualidade dos Dados

Este estudo não condiz no quesito de estudo comparativo. As condições que foram consideradas estão listadas abaixo:

- i. **Cobertura Temporal:** Os dados apurados para o estudo desta pesquisa, englobam os anos de 2020 a 2023, período este referente à construção da estação de tratamento de efluentes até a finalização do estudo. Vale ressaltar, que a data especificada acima exclui as informações coletadas em sites, normas, estudos anteriores e informativos.
- ii. **Cobertura Geográfica:** A ETE estudada está situada no município de São Luís no estado do Maranhão. As coordenadas geográficas aproximam-se de 2° 33' 32.00'' e 44° 15' 56.00'' W.

- iii. **Cobertura Tecnológica:** A tecnologia na qual a estação opera é do tipo reator de Biofilme de Leito Móvel (MBBR) e é composta por etapas de tratamento de nível primário, secundário e terciário.
- iv. **Representatividade:** Os dados foram coletados junto ao acervo disponibilizado pela empresa responsável pela construção da ETE, estudos bibliográficos, dados online, dados de fornecedores, informativos, normas, especificações e levantamento de distâncias percorridas.
- v. **Reprodutibilidade:** A metodologia utilizada é relevante para o estudo da ETE em questão, bem como para estudos futuros que envolva a temática trabalhada, sendo, portanto, reprodutível.

i) Cenários de Estudo

Em relação ao cenário de estudo, foi considerado apenas o cenário construtivo da ETE que contempla as etapas de construção do reator de alvenaria estrutural, o procedimento de escavação e construção das bacias/lagoas de estabilização. Vale ressaltar, que as etapas de demolição e resíduos da construção estudada não foram consideradas no cenário em pauta

RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.9 Fluxos de Referência de Construção da ETE

O resultado dos fluxos de referência de construção da ETE estudada encontra-se na tabela 8, abaixo. Os itens de entrada referem-se aos materiais utilizados na etapa de construção (bacias e reatores) e os combustíveis presentes no maquinário durante a fase construtiva. Igualmente como entradas, porém descritos como processos, considerou-se os transportes dos materiais de construção utilizados até o canteiro de obras. Vale ressaltar que não foram estudadas as emissões e os resíduos construtivos.

Explanando a tabela 8, tem-se que a saída/produto compatibiliza no estudo o efluente tratado na ETE com vazão total para 20 anos de operação, bem como a unidade funcional em metros cúbicos, já convencionada no Objetivo e Escopo da ACV. Para cada entrada conhecida foi especificada a nomenclatura existentes no banco de dados da *Ecoinvent*, presentes no software *SimaPro*. Além da descrição – relevante para a identificação dos itens e reprodução para estudos futuros – são expostas as correlações que se referem as quantidades totais de cada entrada em função da unidade funcional estabelecida no estudo. O mesmo procedimento foi efetuado aos transportes utilizados, obedecendo as unidades já definidas no software *SimaPro*, sendo realizadas as devidas conversões.

Ponderando a tabela 8, dentre os 23 itens de entradas estudados, o material que apresenta o maior índice de correlação com a unidade funcional é a areia. Esse dado corresponde a 0,014800441 kg para cada m³ de efluente tratado. Em segundo lugar por ordem decrescente de correlação, tem-se a brita com o valor de 0,011379894 kg para cada metro cúbico de esgoto tratado, seguido dos materiais de blocos de concreto que apresentam a quantidade de 0,008119686 kg/m³. Os itens equivalentes ao cimento, veículo D, grama utilizada, geomembrana, veículo E, diesel - utilizado no maquinário - manta asfáltica, aço, veículo A e demais itens apresentaram valores inferiores a 0,05 de forma adimensional.

Tabela 8 – Fluxos de Referência para a etapa de construção da ETE

| Saída conhecida - Produtos e co-produtos | Volume Total em 20 anos | Unidade Funcional |
|---|--|---|
| <i>Efluente tratado ETE</i> | <i>1.459.416 m³</i> | <i>1 m³</i> |
| Entradas - Materiais | Descrição no Simapro | Correlação |
| Geomembrana | <i>Polyethylene, high density, granulate</i> | 0,00128476 kg/m ³ |
| PVC | <i>Polyvinylidenchloride, granulate</i> | 0,0000237994 kg/m ³ |
| Registros | <i>Sinter, iron</i> | 0,0000411128 kg/m ³ |
| Cola | <i>Polyvinylchloride, emulsion polymerised</i> | 0,0000000116485 kg/m ³ |
| Caixa Separadora | <i>Polyethylene, high density, granulate</i> | 0,0000150745 kg/m ³ |
| Caixas pré-moldadas | <i>Concrete, medium strenght</i> | 0,000000081128 m ³ /m ³ |
| Grama | <i>Grass, organic</i> | 0,003494549 kg/m ³ |
| Terra Preta | <i>Manure, solid, cattle</i> | 0,0000197339 kg/m ³ |
| Cimento | <i>Cement, Portland</i> | 0,004111234 kg/m ³ |
| Areia | <i>Sand</i> | 0,014800441 kg/m ³ |
| Brita | <i>Gravel, crushed</i> | 0,011379894 kg/m ³ |
| Pregos | <i>Steel, low-alloyed</i> | 0,00000274082 kg/m ³ |
| Madeira | <i>Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed</i> | 0,000000194255 m ³ /m ³ |
| Blocos | <i>Concrete block</i> | 0,008119686 kg/m ³ |
| Aço | <i>Reinforcing steel</i> | 0,00029039 kg/m ³ |
| Manta Asfáltica | <i>Bitumen adhesive compound, hot</i> | 0,000308343 kg/m ³ |
| Gasolina - Maquinário | <i>Petrol, unleaded</i> | 0,0000106049 kg/m ³ |
| Diesel - Maquinário | <i>Diesel</i> | 0,000486332 kg/m ³ |
| Entradas - Processos - Transportes | Descrição no Simapro | Correlação |
| Veículo A | <i>Transport, passenger car, EURO 5</i> | 0,000042619 km/m ³ |
| Veículo B | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric EURO 3</i> | 0,0000750985 tkm/m ³ |
| Veículo C | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric EURO 3</i> | 0,0000633336 tkm/m ³ |
| Veículo D | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric EURO 6</i> | 0,003680357 tkm/m ³ |
| Veículo E | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric EURO 3</i> | 0,000845901 tkm/m ³ |

Fonte: Autor (2023)

A figura 23 ilustrada abaixo, representa o ordenamento de forma decrescente de todos os itens que foram inseridos no software SimaPro para obtenção da ACV de construção, com base no quantitativo fornecido que foi dividido pela unidade funcional em m³. A entrada que ocupou a vigésima terceira e última posição, equivale a cola utilizada, indicada na medida de $1,164865 \cdot 10^{-5}$ kg/m³.

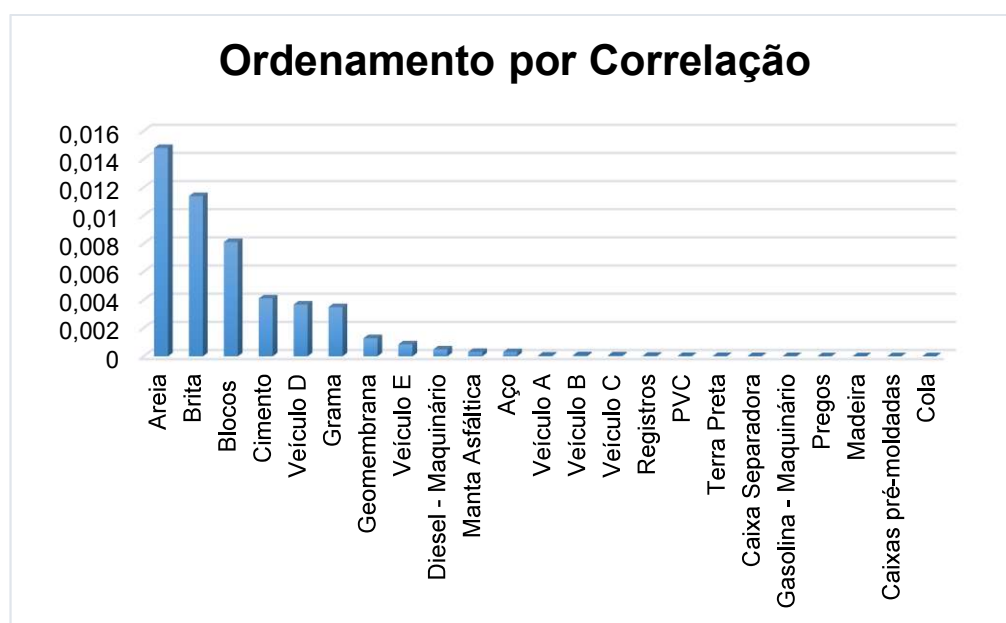
Alguns itens não obedeceram a correspondência em kg/m³, devido as exigências de inserção das entradas contidas no software utilizado. Dessa maneira, para tais elementos foram necessários realizar determinadas conversões de forma a atender as unidades determinadas. A madeira utilizada nas fôrmas ($0,000000194255$ m³/m³) e as caixas pré-moldadas

(0,000000081128 m³/m³) foram convertidas em m³, visto que o software aceitava para tais itens apenas unidades volumétricas. Todavia, a título de informação, no item de metodologias de cálculos de entradas dos fluxos de referências (materiais) presente neste trabalho estão apresentados os quantitativos em massa (kg).

As entradas referentes aos transportes de materiais até o objeto de estudo também foram convertidas para: km/m³ e t.km/m³ de forma a atender as exigências de inserção. Vale destacar que o critério analisado é com base a todos os 23 itens estarem correlacionados a unidade funcional de m³ por efluente tratado durante as duas décadas, sendo assim classificados e analisados de disposição decrescente destes quantitativos.

Destaca-se que grande parte dos dados estudados expuseram durante a correlação, valores com ordens de grandeza entre 10⁻⁵ e 10⁻⁸, resultados por sua vez, pequenos. Entretanto, todos os elementos foram mantidos no inventário de construção da ETE e posteriormente, no AICV, não havendo nenhum critério de exclusão. Dentre as entradas que se encaixam nesse intervalo de ordem de grandeza - de forma decrescente - tem-se: veículo B e C, registros, PVC, terra preta, caixa separadora, gasolina utilizada no maquinário, pregos, caixas pré-moldadas e como anteriormente citada, a cola.

Figura 23 - Ordenamento decrescente baseado na correlação dos fluxos de referências de construção da ETE



Fonte: Autor (2023)

É notório que as unidades que ocupam os quatro primeiros lugares da correlação (areia, brita, blocos de concreto e cimento), correspondem de fato aos maiores quantitativos em massa

utilizados durante a obra, sendo também uns dos principais utilizados, totalizando 56.058 kg ou 56,058 toneladas. Portanto, justifica-se os maiores valores se comparados aos itens de menores quantitativo em massa, logo de menores correlações.

1.10 AICV de Construção da ETE

O método utilizado no presente trabalho, como já citado anteriormente, foi o CML – IA baseline v3.06. Para esse método, o software Simapro forneceu resultados para 11 categorias de impactos, entretanto as categorias consideradas para a análise desse estudo foram: depleção abiótica (combustíveis fósseis), aquecimento global, destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática água marinha, acidificação e eutrofização. A escolha dessas seis categorias deu-se pelo quantitativo utilizado na maioria dos estudos de ACV voltados para tratamento de esgotos e pelas observações dos dados analisados neste estudo com resultados significativos para a categoria de ecotoxicidade aquática marinha.

Na presente pesquisa, foi realizada a análise de forma a verificar as entradas que obtiveram as maiores colaborações dentre as categorias de impacto selecionadas, ou seja, pela análise de contribuição. O software SimaPro juntamente com seu banco de dados da Ecoinvent englobaram todos os processos necessários para a etapa de produção de cada material, não havendo, portanto, nenhuma modificação durante a inserção dos dados para a etapa de avaliação de impactos. Os resultados normalizados obtidos no estudo serão retratados de forma tabulada e gráfica para melhor compreensão.

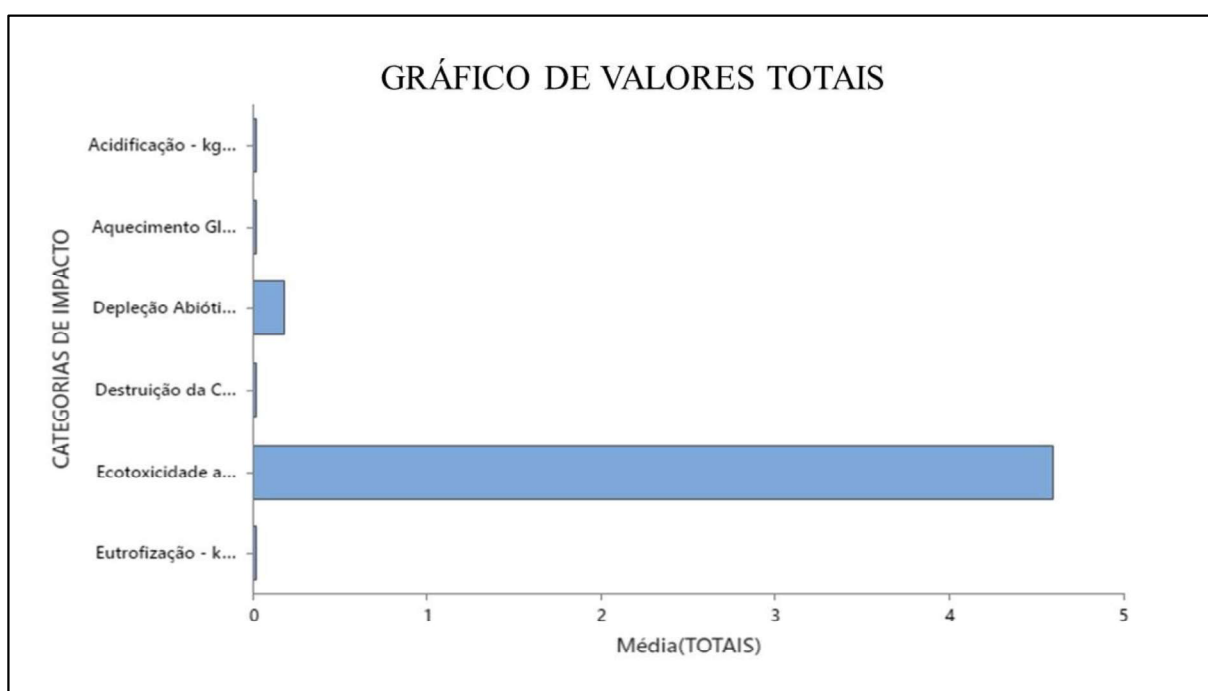
A figura 24 abaixo juntamente com a Tabela 9, apresentam os valores totais entre as seis categorias de impacto da AICV de construção para os 23 itens de entrada. Analisando de forma detalhada, notam-se que as categorias que obtiveram um indicador mais expressivo foram as categorias de ecotoxicidade aquática marinha e a de depleção abiótica (combustíveis fósseis). Para a primeira categoria de ecotoxicidade aquática marinha, obteve-se um total de 4,60 Kg 1,4-DB eq. Em relação a depleção abiótica (combustíveis fósseis) obteve-se o resultado equivalente a 0,18 MJ.

Tabela 9 - Resultados totais da AICV estudada utilizando o método CML I-A baseline v3.06

| CATEGORIAS DE IMPACTO | UNIDADE | TOTAL |
|--|--------------------------|---------------|
| Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) | MJ | 0,18 |
| Aquecimento Global | Kg CO ₂ eq | 0,01 |
| Destruição da Camada de Ozônio | Kg CFC-11 eq | 0,00000000112 |
| Ecotoxicidade aquática marinha | Kg 1,4 -DB eq | 4,60 |
| Acidificação | Kg SO ₂ eq | 0,00005440 |
| Eutrofização | Kg PO ₄ -- eq | 0,0000145 |

Fonte: Autor (2023)

Figura 24 - Gráfico de resultados totais da AICV estudada utilizando o método CML I-A baseline v3.06



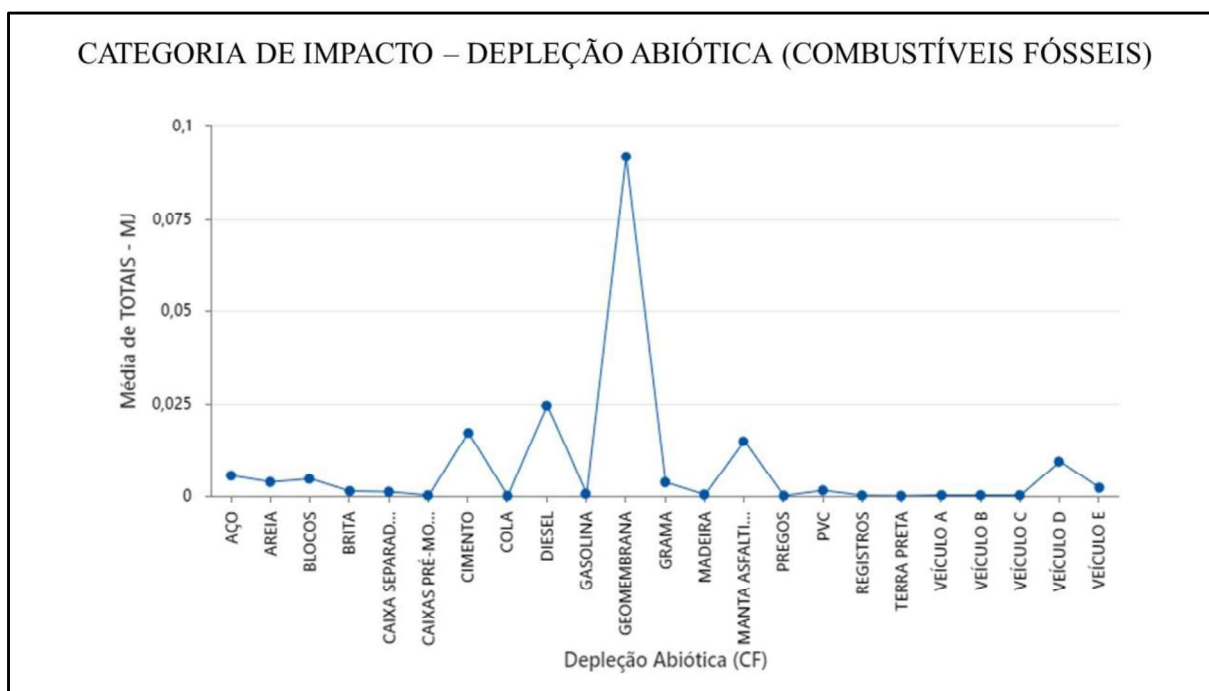
Fonte: Autor (2023)

A primeira categoria a ser apresentada é a de depleção abiótica (combustíveis fósseis) demonstrada na figura 25 abaixo. Para esta categoria, nota-se que o item de maior contribuição foi a geomembrana utilizada nas bacias, apresentando uma porcentagem em 51,02%. O diesel utilizado nos maquinários durante a construção, contribuiu com 13,52% em relação ao total de materiais e na terceira posição, o cimento com 9,40%.

Os demais itens que se encaixaram no percentual abaixo do cimento até o valor de 1% de contribuição foram: a manta asfáltica (8,12%), o transporte nomeado como Veículo D (5,07%), o aço (2,99%), os blocos de concreto (2,51%), a areia (2,04%) e a grama (1,99%). O

item de menor potencial em relação a todos os 23 dados, foi a entrada correspondente a cola com apenas: 0,00037%.

Figura 25 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) utilizando o Método CML I-A baseline v3.06

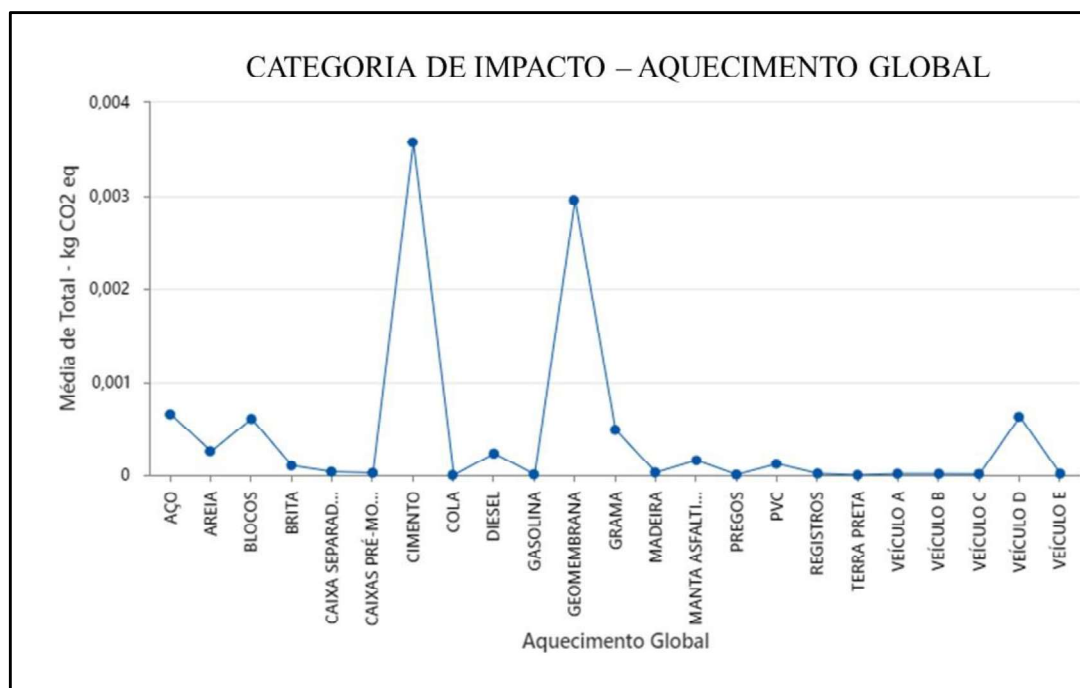


Fonte: Autor (2023)

Os resultados obtidos para a segunda categoria analisada correspondente ao aquecimento global – vide Figura 26 - apontam o cimento como a entrada de maior pontuação, com 36,13%, seguido da geomembrana com aproximadamente 30 % de contribuição (29,86%). O aço, por sua vez, apresentou um percentual de 6,57 % (0,000649 Kg CO₂ eq).

Abaixo do aço, que ocupou a terceira maior posição na categoria, tem-se as demais entradas com contribuições em até 1%, correspondentes ao transporte nomeado como Veículo D (6,31%), os blocos de concreto (6,08%), a grama (4,90%), a areia (2,59%), o diesel (2,33%), a manta asfáltica (1,60%), o PVC (1,21%) e a brita com 1,02%. Representando a entrada de menor colaboração na categoria em questão, tem-se a cola utilizada nas conexões com apenas 0,00035% ou 0,0000000346 Kg CO₂ eq.

Figura 26 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Aquecimento Global utilizando o Método CML I-A baseline v3.06

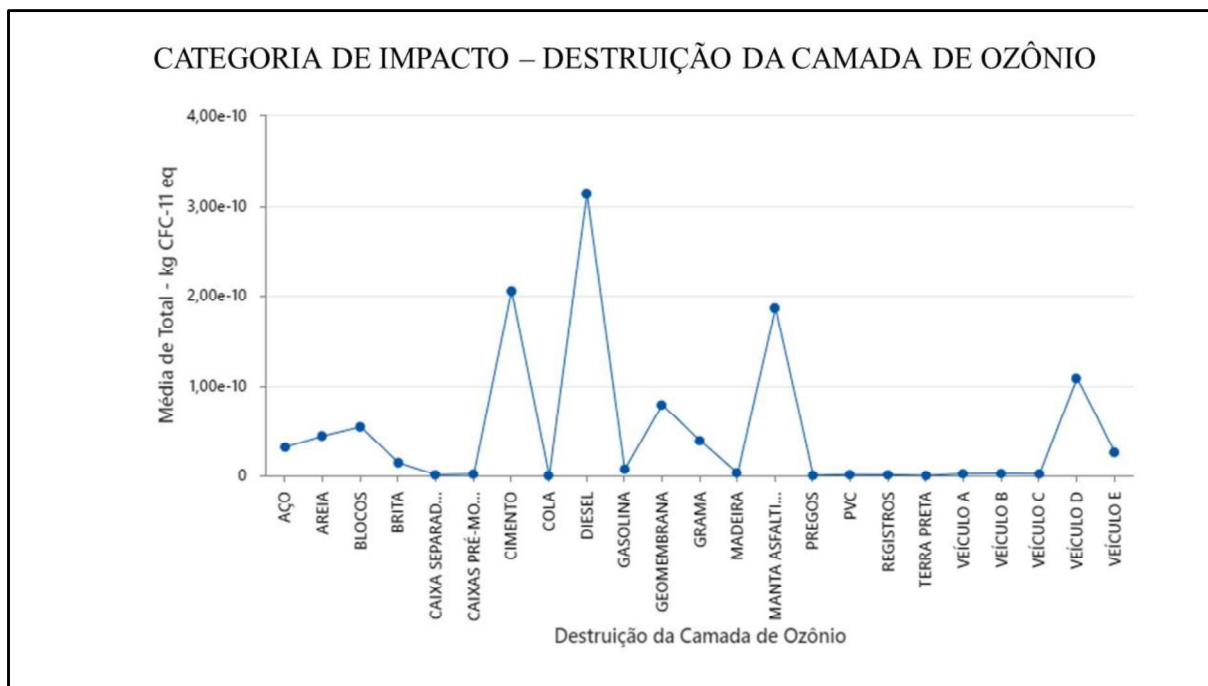


Fonte: Autor (2023)

A terceira categoria estudada foi referente a destruição da camada de ozônio, nos quais seus resultados podem ser observados na Figura 27, abaixo. Em primeiro lugar em maior fator de contribuição, encontra-se o item referente ao diesel utilizado nos maquinários com percentual de 28,48%, seguido do cimento com 18,66% e da manta asfáltica com 16,93%.

Prosseguindo com a classificação realizada nas outras categorias, os demais itens após a terceira colocação e em até 1% de contribuição foram nesta ordem: o Veículo D (9,83%), a geomembrana (7,13%), os blocos de concreto (4,90%), a areia (3,99%), a grama (3,50%), o aço (2,86%) e a brita (1,30%). A cola, novamente, classificou-se como entrada de menor contribuição com 0,0013%.

Figura 27 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Destruição da Camada de Ozônio utilizando o Método CML I-A baseline v3.06

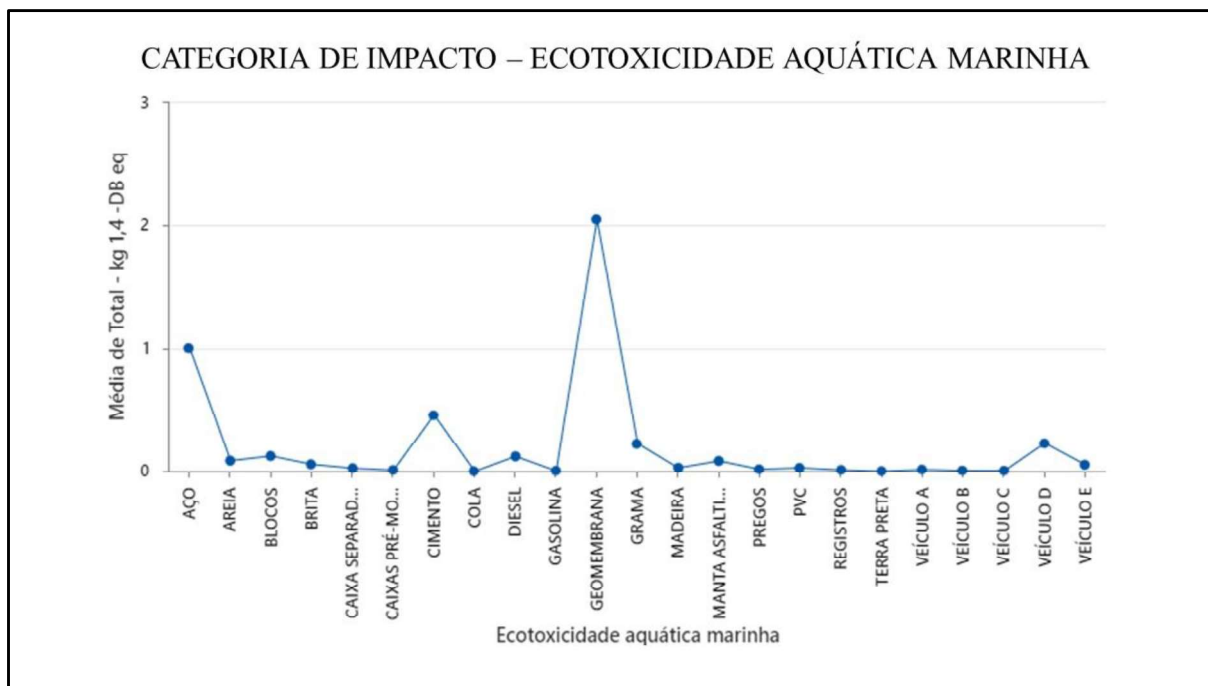


Fonte: Autor (2023)

A quarta categoria avaliada e que apresentou um indicador mais expressivo pelo método em estudo, foi a de ecotoxicidade aquática marinha, que está ilustrada na Figura 28, abaixo. Nesta classe, a geomembrana apresentou uma taxa de 44,98%, seguidamente do aço com 21,94% e pelo cimento com 9,91%.

Em continuidade em ordem decrescente, apresentaram-se o Veículo D com 4,92%, a grama (4,83%), os blocos de concreto (2,68%), o diesel (2,61%), a areia (1,86%), a manta asfáltica com 1,81% e a brita contendo 1,21%. Os demais elementos apresentaram percentuais abaixo de 1%, sendo a cola o último fator contribuinte com 0,00095%.

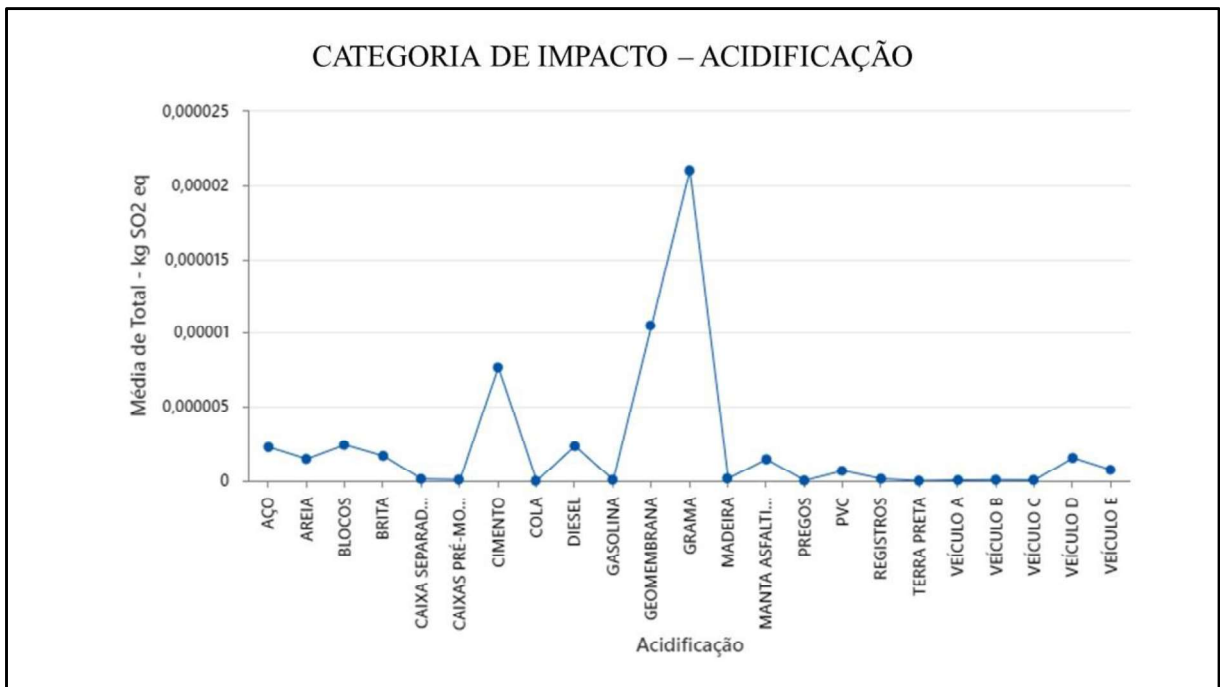
Figura 28 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Ecotoxicidade Aquático Marinha utilizando o Método CML I-A baseline v3.06



Fonte: Autor (2023)

Analisando os resultados obtidos para a categoria de acidificação – vide Figura 29, abaixo – em ordem decrescente de contribuição, nota-se o item referente à grama como maior contribuinte 0,0000210 Kg SO₂ eq (39,02%), em seguida com 19,51%, tem-se a geomembrana e logo após, o cimento com 14,21% ou 0,00000765 Kg SO₂ eq. Em continuação, tem-se os blocos de concreto com 4,46%, o diesel (4,31%), o aço (4,20%), a brita (3,10%) o Veículo D (2,84%), a areia com 2,73%, a manta asfáltica (2,67%) e o PVC com 1,24%. Os itens não citados estão descritos adiante, na tabela 24, e apresentaram resultados inferiores a 1%. A cola, manteve-se como material de menor valor contribuinte com 0,00026%.

Figura 29 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Acidificação utilizando o Método CML I-A baseline v3.06

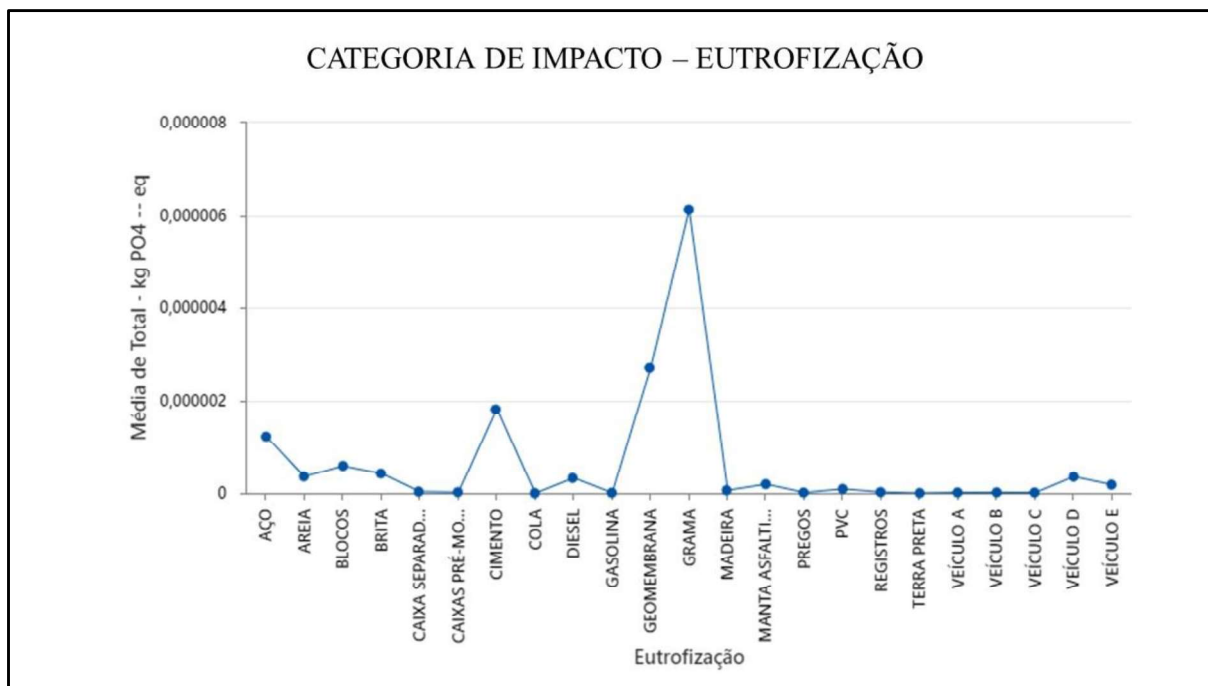


Fonte: Autor (2023)

O último grupo analisado corresponde a categoria de Eutrofização. Os resultados de forma gráfica, encontram-se na imagem 30, logo abaixo. Neste conjunto, os três primeiros maiores itens contribuidores foram nesta ordem: a grama (42,6%), a geomembrana (18,8%) e o cimento (12,53%). Posteriormente, identificaram-se o aço com 8,42%, os blocos de concreto (4,04%), a brita com 2,90%, a areia (2,46%), o transporte representado pelo Veículo D (2,42%), o diesel (2,24%) e a manta asfáltica (1,32%).

Da mesma forma que foi apresentada nas outras categorias, as demais entradas inferiores a 1 % podem ser visualizadas nos apêndices 10 a 15 correspondentes ao grupo. Vale reforçar que a cola se manteve como o item de menor parcela – 0,00033% ou 0,0000000000473 Kg PO₄—eq.

Figura 30 - Gráfico de resultados da AICV para a categoria de Eutrofização utilizando o Método CML I-A baseline v3.06



Fonte: Autor (2023)

Dentre as categorias já apresentadas, notou-se algumas entradas com participações significativas dentre as classes na etapa construtiva da ETE. Vale enfatizar, que todos os 23 itens têm suas contribuições no estudo da ETE em questão, não sendo desconsiderados nenhum dado. No entanto, alguns itens citados receberão uma análise mais particular em resposta às suas maiores parcelas contribuintes e outros, por observações relevantes no estudo voltado à construção.

O maior potencial de impacto relacionado à geomembrana está relacionado ao seu processo de produção. Nota-se a grande participação desse item em todas as categorias analisadas, tais quais a depleção abiótica – combustíveis fósseis (51,02%), ecotoxicidade aquática água marinha (44,98%), aquecimento global (29,86%), acidificação (19,51%), eutrofização (18,8%) e destruição da camada de ozônio (7,13%). A geomembrana utilizada neste estudo possui em sua composição o polietileno de alta densidade (MACCAFERRI, 2023), uns dos polímeros plásticos que tem como matéria-prima o petróleo – combustível fóssil de grande relevância. O processo de destilação do petróleo nas refinarias, no qual obtém-se os seus derivados, tais quais os plásticos, resultam em liberação de gases durante seu processo de queima. Evidenciando, os resultados correspondentes na pesquisa. Vale destacar que o processo

de aplicação deste material em campo não foi considerado, no qual comumente utiliza-se máquinas de soldagem - visto que essa informação não foi disponibilizada e adicionada ao inventário de estudo.

Em relação a categoria de ecotoxicidade aquática marinha, no qual obteve-se a maior quantidade total em comparação as outras classes do método CML, algumas considerações podem ser pontuadas de forma a validar esses resultados. Dentre os principais objetivos presentes na ecotoxicologia, estão as determinações dos níveis de contaminantes no ambiente e seu destino e; estimar o grau de periculosidade dos contaminantes e seus metabólicos para organismos vivos (POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS; LÓPEZ-DOVAL, 2022)

Alguns estudos vêm sendo realizados a respeito dos microplásticos de forma a compreender melhor essa poluição nos ambientes marinhos (POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS; LÓPEZ-DOVAL, 2022). Isso se deve ao fato que os principais microplásticos encontrados em ambientes aquáticos de água doce e marinha são o poliestireno, o polipropileno e o polietileno. Por essa razão, podem ser considerados os motivos pelo qual a geomembrana apresentou a maior contribuição nessa categoria por apresentar em sua composição, o polietileno.

O cimento também se apresentou como um dado de análise importante, visto que é um dos materiais mais utilizados e significativos na construção civil. Além disso, como já citado neste trabalho, são vários os estudos que apontam o elevado impacto que este insumo ocasiona ao meio ambiente. Dentre as categorias analisadas, a de aquecimento global atingiu 36,13%, enquanto a de destruição da camada de ozônio, 18,66%. As demais corresponderam a 14,21% para acidificação; 12,53% para eutrofização e 9,92%, para ecotoxicidade aquática de água marinha.

Salienta-se que esse material existente na indústria da construção civil durante seu processo produtivo de clínquer emite taxas elevadas de dióxido de carbono na atmosfera. O que explica os níveis mais elevados para as categorias de aquecimento global e destruição da camada de ozônio. Essa produção de clínquer, no qual possui 50 % das emissões são provenientes da calcinação do carbonato de cálcio e a porcentagem remanescente, da queima de combustíveis fósseis(CALDAS; TOLEDO FILHO, 2019b). Em virtude disso, é fundamental a procura de novas tecnologias que possam substituir esses materiais que constituem a etapa de

cliquerização de forma a reduzir esses impactos e também; que garantam as características dos materiais cimentícios.

O estudo levou em consideração ao maquinário utilizado durante a obra, dividindo-se nos equipamentos abastecidos à diesel e a gasolina, como já descrito. Dentre esses dois tipos de combustíveis, o diesel foi o que apresentou maior presença diante aos impactos analisados. A contribuição mais significativa foi na classe de destruição da camada de ozônio com porcentagem em 28,48% e na categoria de depleção abiótica (combustíveis fósseis) com 13,52% - vale frisar, a presença em todos os grupos analisados nesse estudo. O óleo diesel é um derivado do petróleo – que gera poluentes durante essa etapa - de grande aplicabilidade e para esta pesquisa, utilizado como combustível.

Assim como sua aplicabilidade em diversas áreas, os seus processos de combustão – bastante complexa no qual há liberação de CO₂ - causando diversos impactos negativos ao meio ambiente, tais como a destruição da camada de ozônio. Dessa forma, os resultados do diesel no estudo correspondem aos efeitos da categoria. De maneira a minimizar esses impactos, a substituição de combustíveis menos danosos, tais como o biodiesel é extremamente válida, visto que o mesmo, é renovável, não tóxico, biodegradável e favorece o meio ambiente (THANGARAJ *et al.*, 2019).

O item correspondente a grama apresentou os maiores resultados nas categorias de eutrofização (42,6%) e acidificação (39,02%). Estes resultados apresentam-se de forma indagadora, visto que a grama natural apresenta inúmeros benefícios ao meio ambiente, tais como: redução da poluição, da erosão do solo, liberação de oxigênio e absorção do dióxido de carbono entre outros benefícios (CHUSQUEA, 2017) - além da função de proteção dos taludes, tal qual no estudo em questão.

Portanto, supõe-se que os resultados se mostraram elevados devido a presença de fertilizantes na composição do item “grass” do banco de dados da Ecoinvent, referente a entrada: grama, no inventário de construção da ete estudada. Visto que a acidificação do solo é causada principalmente pelo uso demasiado de fertilizantes à base de nitrogênio e enxofre (ACV, 2021) e na eutrofização, os principais elementos causadores do aumento desta são causados por elementos como o nitrogênio e o fósforo que também podem ser encontrados em fertilizantes. (ACV, 2020). Desta maneira, um estudo mais aprofundado a respeito desse resultado pode ser feito de forma a obter conclusões mais precisas.

A categoria em que o aço obteve um maior percentual foi a referente a ecotoxicidade aquática marinha, ocupando a segunda posição com 21,94% e também com participação na categoria de aquecimento global (6,57%). O impacto causado pelo aço é mediante ao ser processo de fabricação que ocorre a partir do minério de ferro, carvão e cal (IABR, 2016).

A etapa de transporte de materiais não se mostrou muito significativa nesta pesquisa, sendo apenas o item de transporte classificado como Veículo D - responsável pelos transportes dos materiais de distâncias maiores: a caixa separadora (2.951 km) e a geomembrana (2.830 km) - com participações mais sutis em algumas categorias, tais como depleção abiótica, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e ecotoxicidade aquática marinha. Portanto, a distância foi fundamental para uma contribuição maior se comparada aos outros transportes que realizaram trajetos dentro da cidade na qual encontrava-se a obra em estudo.

Embora a entrada correspondente a areia ter apresentado a maior correlação com a unidade funcional do ICV de construção da ETE – $0,0148 \text{ kg/m}^3$ – esta não apresentou resultados muito superiores nas 6 categorias de impactos analisadas, visto que confere a um agregado que não exige muito processamento. Entretanto, o item correspondente a geomembrana que não apresentou um valor tão elevado - $0,00128 \text{ kg/m}^3$, se comparado a areia, mas esteve presente com contribuições mais elevadas dentre as categorias. Embora o item correspondente a cola tenha sido o de menor correlação e impacto; para este estudo, analisa-se, portanto, que a correlação com a unidade funcional obtida no ICV de construção não possui correspondência total direta com o quantitativo de materiais utilizados e os seus respectivos potenciais de impacto. Nota-se a importância da constituição do material e seu processo produtivo.

CONCLUSÕES

A avaliação do ciclo de vida de construção da ete do tipo lagoa de estabilização foi realizada para as seis categorias escolhidas do método de avaliação de impactos CML: depleção abiótica (combustíveis fósseis), aquecimento global, destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática água marinha, acidificação e eutrofização.

A ACV empregada na etapa construtiva da pesquisa, possibilitou a observação dos aspectos que permitiram os maiores potenciais de impactos associados a fase de construção da ete estudada, bem como a identificação das entradas que alcançaram as maiores parcelas de contribuições nesses impactos gerados ao meio ambiente.

Para a pesquisa realizada, a categoria de impacto que obteve maior expressividade, foi a de ecotoxicidade aquática marinha com um percentual de 96,01%. Dentre as categorias de forma individualizada, os itens que apresentaram maiores contribuições foram: depleção abiótica (geomembrana com 51,02%); aquecimento global (o cimento com 36,13%); destruição da camada de ozônio (diesel com 28,48%) e a ecotoxicidade aquática de água marinha (geomembrana 44,98%). As classes de acidificação e eutrofização foram representadas pela grama utilizada nos taludes com colaborações de 39,02% e 42,6%, respectivamente.

O presente estudo reforçou a participação de uns dos principais insumos poluidores utilizados na construção civil – o cimento – bem como a importância de estudos e alternativas que propiciem medidas mais sustentáveis no seu processo de clínquerização, a fim de minimizar as emissões de poluentes na atmosfera, mas que também garantam as propriedades fundamentais existentes no material de construção apontado.

Alguns resultados obtidos no estudo, tais como a geomembrana – na categoria de ecotoxicidade aquática água marinha – e a grama (nas classes de acidificação e eutrofização) trouxeram questionamentos relevantes à pesquisa voltadas a ACV de construção para a tipologia de lagoa de estabilização. A geomembrana apresentou-se como um material de grande fator de impacto ambiental. Recomenda-se estudos mais aprofundados, tais como aplicações de mais métodos de impactos e uma análise de sensibilidade, a fim de obter resultados mais precisos e de conclusões mais apropriadas. Além de explorar mais a influência que as regiões litorâneas ocasionam nesse tipo de estações.

Um outro fator observado neste estudo, refere-se entre a influência que a correlação dos dados de entrada (com a unidade funcional adotada) e os resultados obtidos na avaliação de impactos. Conclui-se que não há uma relação direta entre esses fatores e que possa ser utilizada como parâmetro para as determinações maiores ou menores contribuições nas categorias de impactos. Ao contrário dos processos produtivos e constituições desses dados/materiais que exerceram maiores intervenção nos resultados.

Evidencia-se a importância de obtenção de dados primários e um maior rigor com os dados obtidos de forma secundária. Como citado diversas vezes no trabalho, a maioria das informações obtidas foram adotadas de forma a adequar-se ao objeto de estudo, sendo a grande parte oriunda de suposições e pesquisas, devido a escassez de informações, o que aumentou as incertezas dos resultados adquiridos. Além disso, reforça-se a relevância de dados voltados a realidade brasileira, bem como métodos de avaliações de impacto que também possuem um grande peso na confiabilidade dos produtos estudados.

De maneira geral, notam-se que os objetivos específicos da pesquisa científica foram atingidos, além de proporcionar margens para estudos futuros que possam ser utilizados como trabalhos comparativos em estudos de acvs de construção do tipo lagoa de estabilização e como continuidade das lacunas existentes.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Recomenda-se para trabalhos futuros, uma continuidade desta pesquisa utilizando uma combinação de mais métodos de avaliações de impactos que estejam relacionados à realidade do Brasil e, uma análise de sensibilidade de forma a preencher as lacunas geradas;
- b) Propõe-se estudos de ACV de construções de etes do tipo lagoa de estabilização nos quais sejam abordados de forma mais incisiva com relação as medidas sustentáveis nos itens mais impactantes ao meio ambiente; bem como a influência gerada no custo total da obra.

REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044 Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.** [S. l.: s. n.], 2014a. *E-book*.

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** [s. l.], p. 21, 2014b.

ACVBRASIL. **Simapro**, 2023. Disponível em :<
<https://acvbrasil.com.br/software/simapro>>. Acesso em: 02 janeiro 2023

ACVbrasil. **Desmistificando as Categorias de Impacto: Acidificação**, 2021 . Disponível em: <*<https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-acidificacao#:~:text=Em%20ci%C3%A7%C3%A3o%20do%20equil%C3%ADbrio%20ecol%C3%B3gico>*>. Acesso em 20 de janeiro de 2023

ACVbrasil. **Desmistificando as Categorias de Impacto: Eutrofização**, 2020. Disponível em: <*<https://acvbrasil.com.br/artigo/desmistificando-eutrofizacao>*>. Acesso em 20 de janeiro de 2023

AUTOSSUSTENTÁVEL. **Análise do ciclo de vida uma ferramenta para calcular impactos ambientais**, 2015. Disponível em: <
<https://autossustentavel.com/2015/12/analise-do-ciclo-de-vida-uma-ferramenta-para-calculer-impactos-ambientais.html>>. Acesso em: 24 janeiro de 2023

ALCANTARA, Débora Lana Farias de; PINTO, Fabiana Rocha. **Saneamento Básico. Compêndio Amazônico: Noções sobre Meio Ambiente**, [s. l.], p. 101–105, 2021. Disponível em: *<https://doi.org/10.22533/at.ed.12721220322>*

ALVES, Pedro *et al.* **Ii-102 - Utilização Do Lodo De Lagoas De Estabilização No.** [s. l.], n. 1, 2019.

ANA. **O Atlas Esgoto – Situação da Coleta.** 2022. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>> Acesso em :28, janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209 **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** [S. l.: s. n.], 2011.

BAI, Shunwen *et al.* **Using site-specific life cycle assessment methodology to evaluate Chinese wastewater treatment scenarios: A comparative study of site-generic and site-specific methods.** Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 144, p. 1–7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.172>

BUENO, Cristiane. **Plicação Da Mod.** [s. l.], 2016.

CALDAS, Lucas Rosse; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. **Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para o bloco de concreto e diferentes argamassas.** LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 34–61, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.18225/lalca.v2i2.4143>

CALDAS, Lucas Rosse; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. **Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para o bloco de concreto e diferentes argamassas.** LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 34–61, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.18225/lalca.v2i2.4143>

CAMPOLINA, Juliana Mendes; SIGRIST, Carolina São Leandro; MORIS, Virgínia Aparecida da Silva. **Uma Revisão De Literatura Sobre Softwares Utilizados Em Estudos De Avaliação Do Ciclo De Vida.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, [s. l.], p. 735–750, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117015494>

CAMPOS, J.R. **Alternativas para tratamento de esgotos:pré-tratamento de águas**

para abastecimento (publicação n.09). Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1994.

CHERUBINI, E.; ZANGHELINI, G.; SOUZA JR., H. **Guia Básico de Análise do Ciclo de Vida (ACV)**. [s. l.], p. 30, 2019. Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/materiais/>

COLANGELO, Francesco *et al.* **Life cycle assessment of recycled concretes: A case study in southern Italy**. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 615, p. 1506–1517, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107>

CORBELLA, Clara; PUIGAGUT, Jaume; GARFÍ, Marianna. **Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells**. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 584–585, p. 355–362, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.186>

COROMINAS, Lluís *et al.* **The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review**. *Water Research*, [s. l.], v. 184, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058>

CONVERSOR. **1 l de óleo Diesel em kg**, 2022. Disponível em: < 1 l de óleo Diesel em kg (conversor-de-medidas.com) >. Acesso em: 12 de agosto de 2022

CONVERSOR. **1 l de óleo Diesel em kg**, 2022. Disponível em: < 1 litro de gasolina em quilogramas (conversor-de-medidas.com) >. Acesso em: 12 de agosto de 2022

CHUSQUEA. **Os benefícios da grama natural**, 2017. Disponível em :< <https://chusqueapaisagismo.com.br/os-beneficios-da-grama/#:~:text=Liberam%20oxig%C3%AAnio%20e%20refrescam%20o,eficientes%20na%20redu%C3%A7%C3%A3o%20da%20polui%C3%A7%C3%A3o.>> . Acesso em 25 de janeiro de 2023

DELL'OSBEL, Naira; MACHADO, Ênio Leandro. **Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de tratamento de efluentes urbanos utilizando Microalgas e Wetlands Construídos**. Revista Monografias Ambientais, p. e1-e1, 2019.

DE CONTO, Vanessa; LUCAS DE OLIVEIRA, Marcos; ELISA RUPPENTHAL, Janis. **Environmental certifications: contribution to sustainability in construction in Brazil**. Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 100–127, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i4.1749>

DE FEO, G.; FERRARA, C. **A procedure for evaluating the most environmentally sound alternative between two on-site small-scale wastewater treatment systems**. Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 164, p. 124–136, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.205>

FERRARESI DE ARAUJO, Geraldo Jose. **O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 8, n. 57, p. 52–61, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/2318847285720202069>

FERREIRA, Tamiris Capellaro. **Impactos e desafios da construção civil brasileira para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação (Mestrado) -Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 178p, 2018

FGV, PCRJ SCO-Sistema de Custos de Obras e Serviços de Engenharia. **Pesos Específicos de Materiais de Construção**. [s. l.], p. 0–7, 2020. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8142480/4217656/TABELASOFGV02.pdf>

GALLEGO-SCHMID, Alejandro; TARPANI, Raphael Ricardo Zepon. **Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review**. Water Research, [s. l.], v. 153, p. 63–79, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.010>

GARFÍ, Marianna; FLORES, Laura; FERRER, Ivet. **Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds.** Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 161, p. 211–219, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.116>

GERHARDTH, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa.** Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil - UAB/UFRGS e pelo curso de Graduação Tecnológica - Planejamento e Gestão para o desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS - Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. 120p.; 17,5x25cm

GUTIERREZ, Katia Gonçalves. **Analysis and management of environmental impacts on domestic wastewater treatment by life cycle assessment.** Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], n. 2, p. 129, 2014.

HERNÁNDEZ-PADILLA, Flor *et al.* **Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility.** Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 142, p. 2140–2153, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>

IABR. **Aço**, 2016. Disponível em :< <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/mdic/comercio-exterior/metarlurgia-e-siderurgia-2#:~:text=A%20fabrica%C3%A7%C3%A3o%20do%20a%C3%A7o%20pode,%2C%20redu%C3%A7%C3%A3o%2C%20refino%20e%20lamina%C3%A7%C3%A3o.&text=Grande%20parte%20do%20min%C3%A9rio%20de,e%20transforma%2Dse%20em%20coque>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2023

IPT. **Informações sobre madeiras**, 2023. Disponível em: <https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7>. Acesso em :12 agosto de 2022

ITOGRASS. **Tapete de grama**, 2022. Disponível em: < <https://itograss.com.br/formatos/tapete/#:~:text=20%20kg%2Fm%C2%B2.>>. Acesso em: 12 agosto de 2022

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6a ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., & Zhang, W. (2013). **Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China**. *Journal of Cleaner Production* , 57 , 221-227.

LOPES, Thais. **Avaliação do ciclo de vida de uma ete composta por reator UASB seguido de wetlands construídos**. [s. l.], 2014.

LOPES, Thaís Andrade de Sampaio *et al.* **Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos**. *Revista DAE*, [s. l.], v. 65, n. 208, p. 47–55, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2017.005>

LOPSIK, K. **Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system**. *International Journal of Environmental Science and Technology*, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 1295–1308, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0159-y>

LORENZO-TOJA, Yago *et al.* **Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants**. *International Journal of Life Cycle Assessment*, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 357–367, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1316-9>

LUTTERBECK, Carlos A. *et al.* **Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas**. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 148, p. 527–536, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.024>

LUZ, Gelson. **Peso específico da Brita (0, 1, 2, 3, 4 Granítica Calcária**. *Materiais por Gelson Luz*, [s. l.], 2018. Disponível em:

<<https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/peso-especifico-brita.html>>.
Acesso em: 12 agosto de 2022

LUZ, Gelson. **Densidade do Concreto (Componentes, Cálculo do Peso e Infográfico)**. Materiais por Gelson Luz, [s. l], 2018. Disponível em:<<https://www.materiais.gelsonluz.com/2018/09/densidade-do-concreto.html#:~:text=Usualmente%20adota%2Dse%3A,kg%2Fm%C2%B3%20para%20concreto%20armado>>. Acesso em: 12 de agosto de 2022

MAIA DE SOUZA, Danielle *et al.* **Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls**. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 137, p. 70–82, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>

MACCAFERRI. **Geomembranas**, 2023. Disponível em: <<https://www.maccaferri.com/br/produtos/geomembranas/>>. Acesso em 12 de agosto de 2022

MARINKOVIĆ, Snežana *et al.* **Environmental assessment of green concretes for structural use**. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 154, p. 633–649, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015>

MARA, D.D. **Sewage treatment in hot climates**. London: Jhon Wiley & Sons, 1976

MARA, D.D. **Waste stabilization ponds and wastewater storage and treatment reservoirs: the low-cost production of microbiologically safe effluents for agricultural and aquacultural reuse**. In: *Wastewater Reclamation and reuse*. Flórida: CRC Press, 1998. v.10

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos**. *Production*, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 160–175, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

MENEZES, Afonso Henrique Novaes et al. **Metodologia científica: teoria e aplicação na educação a distância**. Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina-PE, 2019.

MENDONÇA, SERGIO ROLIM; MENDONÇA, LUCIANA COELHO. **Sistemas sustentáveis de esgotos: orientações e técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reuso na agricultura** – 2.ed. revista – São Paulo: Blucher, 2017.

MOUSSAVI, S., THOMPSON, M., Li, S., & Dvorak, B. (2021). **Assessment of small mechanical wastewater treatment plants: Relative life cycle environmental impacts of construction and operations**. *Journal of Environmental Management* , 292 , 112802.

MORAIS, Rafael Meira De; GOUVINHAS, Reidson Pereira. **Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil**. *Revista Ibero - Americana de Estrategia*, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 39–44, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/riae.v7i1.972>

MORERA, Serni *et al.* **Evaluation of different practices to estimate construction inventories for life cycle assessment of small to medium wastewater treatment plants**. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 245, p. 118768, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118768>

MORERA, Serni *et al.* **Using a detailed inventory of a large wastewater treatment plant to estimate the relative importance of construction to the overall environmental impacts**. *Water Research*, [s. l.], v. 122, p. 614–623, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.069>

NUNTEC. **Saiba como calcular a média de consumo de diesel de máquinas agrícolas**, 2019. Disponível em : < Saiba como calcular a média de consumo de diesel de máquinas agrícolas - Nuntec Agro > . Acesso em: 02 de janeiro de 2023

PAPER, Conference. **Revisão Bibliográfica sobre a Avaliação do Ciclo de Vida**

dos Eletrônicos no Brasil Revisão Bibliográfica sobre a Avaliação do Ciclo de Vida dos Eletrônicos no Brasil. [s. l.], n. January, 2021.

PEARSON, H. W. **Expanding the horizons of pond technology and application in**

na environmentally conscious world. Water Science and Technology, v. 33, n.7, p.1-9, 1996.

PIEKARSKI, Cassiano Moro *et al.* Revista Gestão Industrial **MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA: ESPECIFICIDADES BRASILEIRAS** **LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHODS : A DISCUSSION OF METHODS ADOPTION IN BRAZILIAN SPECIFITIES.** [s. l.], p. 222–240, 2012.

PILZ, Thaisa Lana; MACENO, Marcell Mariano Corrêa. **Avaliação Do Ciclo De Vida E Construção Civil: Uma Revisão Da Literatura Acerca Da Avaliação De Residências Unifamiliares.** The Journal of Engineering and Exact Sciences, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 0049–0055, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecv16iss1pp0049-0055>

PLANSAB. Nacionais De Saúde , Recursos Hídricos E Meio Ambiente. [s. l.], p. 240, 2019. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao_Consehos_Resolucao_Alta_-_Capa_Atualizada.pdf

POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; LÓPEZ-DOVAL, J. C. **Aspectos da ecotoxicidade em ambientes aquáticos.** [S. l.: s. n.], 2022.

PONS, Joaquín J. *et al.* **Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison.** Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 192, p. 411–420, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.268>

PURGARE. **Memorial descritivo e de cálculo.** Estação de Tratamento de Efluentes sanitários. Sistema MBBR - São Luís, 2020

PROETTI, Sidney. **As Pesquisas Qualitativa E Quantitativa Como Métodos De Investigação Científica: Um Estudo Comparativo E Objetivo.** Revista Lumen - ISSN: 2447-8717, [s. l.], v. 2, n. 4, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.32459/revistalumen.v2i4.60>

PRYCE, David; MEMON, Fayyaz Ali; KAPELAN, Zoran. **Life Cycle Analysis approach to comparing environmental impacts of alternative materials used in the construction of small wastewater treatment plants.** Environmental Advances, [s. l.], p. 100065, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100065>

RESENDE, Juliana Dalila. **Avaliação do ciclo de vida ambiental e econômica de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto envolvendo wetlands construídos.** Tese (Doutorado) -Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciência e Humanidades, Universidade de São Paulo.São Paulo 183f, 2018 .

RISCH, Eva *et al.* **Life cycle assessment of urban wastewater systems: Quantifying the relative contribution of sewer systems.** Water Research, [s. l.], v. 77, p. 35–48, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.006>

SABESP. NTS 230 **Projeto de lagoas de estabilização e seu tratamento complementar para esgoto sanitario.** [s. l.], p. 30, 2009.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico** [livro eletrônico]. [S. l.: s. n.], 2017.

SOARES, Sebastião Roberto; DE SOUZA, Danielle Maia; PEREIRA, Sibeli Warmiling. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil.** Coletânea Habitare, [s. l.], v. 7, n. 1985, p. 96–127, 2006.

SUDOE, Territorial; IV, Interreg. **Manual explicativo da Avaliação de Ciclo de Vida aplicada ao setor da construção.** [s. l.], p. 58, 2012.

TAKANO, Atsushi *et al.* **Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment.** Building and Environment, [s. l.], v. 79, p. 20–30, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.025>

TEXACO. **Sistema Euro 6: você já sabe tudo sobre a norma?**, 2021. Disponível em: < Sistema Euro 6: você já sabe tudo sobre a norma? - Blog Texaco >. Acesso em: 02 de janeiro de 2023

THANGARAJ, Baskar *et al.* **Catalysis in biodiesel production - A review.** Clean Energy, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 2–23, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zky020>

UNICEF. **1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso a água potável, dizem o UNICEF e a OMS.** 2019: Disponível em: < <https://www.unicef.org/brazil/comunicados-de-imprensa/1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-agua-potavel-dizem-unicef-oms> > Acesso em: 28, janeiro, 2022.

VIEIRA, Darli Rodrigues; CALMON, João Luiz; COELHO, Felipe Zanellato. **Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review.** Construction and Building Materials, [s. l.], v. 124, p. 656–666, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>

VIVENDOBAURU. **Quantos quilos tem 1 m³ de terra?** 2022. Disponível em: < <https://www.vivendobauru.com.br/quantos-quilos-tem-1-m3-de-terra/#:~:text=Peso%20espec%C3%ADfco%20por%20m%C2%B3.,Fina%3A%201.400%20Kg%2F%20m%C2%B3.> > Acesso em: 12 agosto de 2022

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias- V3 - 2ed - Von Sperling_LIVRO.pdf.** [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/busca?q=Lagoas de Estabilização - Princípio do Tratamento Biológico das águas Residuárias- V1 - 2ed - Von Sperling>

VON SPERLING, M. **Princípios de tratamento biológico de águas residuais: princípios básicos de tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 1996.v.2

WEIDEMA, B.P. *et al.* **Ecoinvent - Overview and methodology**. [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–169, 2013. Disponível em: https://ecoinvent.org/wp-content/uploads/2020/10/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506_.pdf

XUE, Xiaobo *et al.* **Holistic analysis of urban water systems in the Greater Cincinnati region: (1) life cycle assessment and cost implications**. Water Research X, [s. l.], v. 2, p. 100015, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2018.100015>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 1

Quantitativo total dos materiais obtidos no orçamento

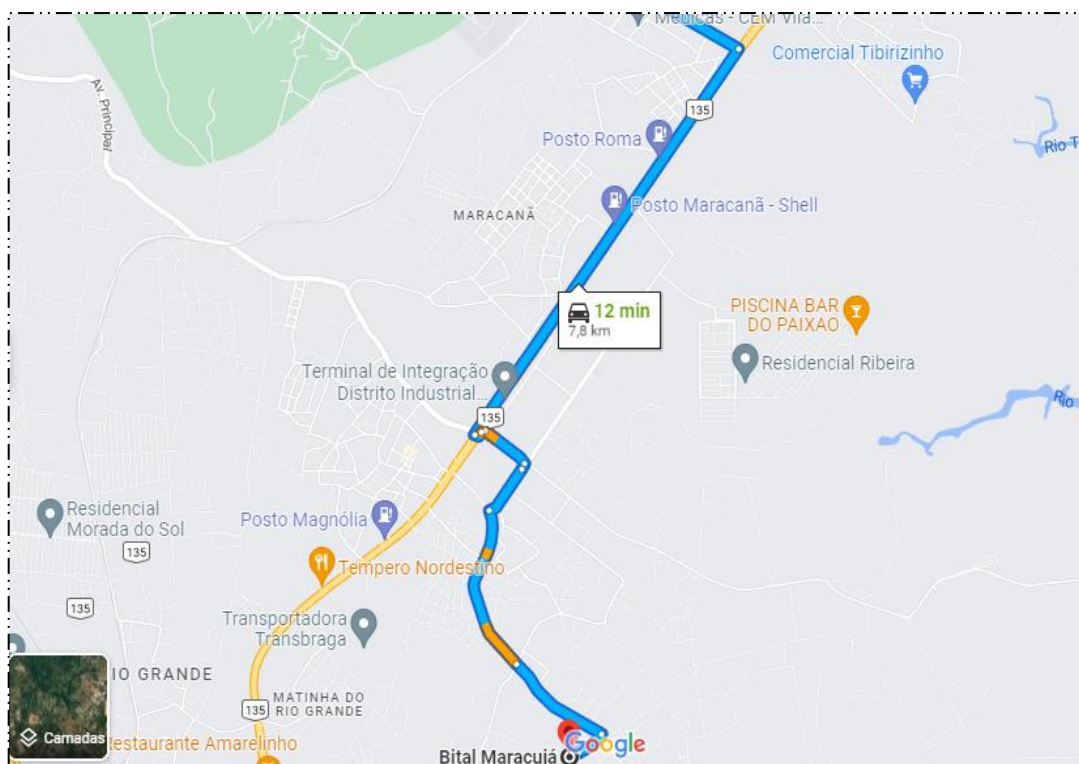
| ITEM | QUANTIDADE | KG | KG TOTAL | FONTE |
|--|------------|---------------|----------|--------------------------|
| Bloco Estrutural 14x19x39 | 900 blocos | 12,5 Kg/bloco | 11250 | Empresa Fornecedora |
| 1/2 Bloco de 14 x 19 x 19 | 100 blocos | 6 kg/bloco | 600 | Empresa Fornecedora |
| Barra de Aço de 8 mm | 11 barras | 5 kg/barra | 55 | Empresa Fornecedora |
| Barra de Aço de 10 mm | 28 barras | 7,5 kg/barra | 210 | Empresa Fornecedora |
| Barra de Aço de 6,3 mm | 30 barras | 3 kg/barra | 90 | Empresa Fornecedora |
| Barra de Aço de 6 m p/ estribo | 10 barras | 1,92 kg/barra | 19,2 | Empresa Fornecedora |
| Arame recozido | 6 kg | 6kg | 6 | Orçamento |
| Tela Soldada Q92 | 2 Telas | 21,80 kg/tela | 43,6 | Empresa Fornecedora |
| Tábua de 3 m x 0,15 m | 18 tábuas | 7,56 kg/tábua | 136,08 | Dados Online - Densidade |
| Areia Média | 12 m³ | 1800 kg/m³ | 21.600 | Dados Online - Densidade |
| Cimento | 120 sacos | 50 kg/saco | 6.000 | Orçamento |
| Brita 1 | 12 m³ | 1384 kg/m³ | 16.608 | Dados Online - Densidade |
| Manta Asfáltica 3 mm poliéster | 10 rolos | 45 kg / rolo | 450 | Empresa Fornecedora |
| Prego 2.1/2 10 | 4 kg | 4 kg | 4 | Orçamento |
| Geomembrana Maccaferri | 1250 m² | 1,5 kg/m² | 1.875 | Empresa Fornecedora |
| Caixa Separadora de Água e Oleo | 1 und | 22 kg | 22 | Dados online |
| Tubo PBA 110mm Barra 6m | 4 und | 0,018463 kg | 0,073852 | Tigre |
| Tubo PBA 75mm Barra 6m | 6 und | 0,010948 kg | 0,065688 | Tigre |
| Registro de Gaveta FF Bolsa Bolsa 110mm | 1 und | 37 kg | 37 | Dados online |
| Registro de Gaveta FF Bolsa Bolsa 75mm | 1 und | 23 kg | 23 | Dados online |
| Curva PBA 90g 75mm | 2 und | 0,87 kg | 1,74 | Tigre |
| Curva PBA 45g 75mm | 2 und | 0,7975 kg | 1,595 | Tigre |
| Curva PBA 45g 110mm | 2 und | 2,004 kg | 4,008 | Tigre |
| TE PBA 110mm | 1 und | 0,83378 kg | 0,83378 | Dados online |
| Redução PBA 110x75mm | 1 und | 0,43 kg | 0,43 | Dados online |
| Adesivo CarPlast "Fibrar Caixas D'água 5M³ | 5 und | 1kg | 5 | Empresa Fornecedora |
| Taps 100mm Testes de Vazamento Caixas 5m³ | 3 und | 0,4028 kg | 1,2084 | Dados online |
| Cola de Cano Testes de Vazamento Caixas 5m³ | 1 und | 0,017 kg | 0,017 | TekBond |
| Tubo PVC 100mm P/ Gradeamento | 1 und | 0,88 kg/m | 5,28 | Tigre |
| Tubo PVC Sold 50mm | 4 und | 0,39 kg/m | 9,36 | Tigre |
| Luva PBA C/ Anel 110mm | 2 und | 0,3292 kg | 0,6584 | Dados online |
| Joelho PVC Soldavel 90° 50mm | 6 und | 0,11513 kg | 0,69078 | Dados online |
| Joelho PVC Soldavel 45° 50mm | 2 und | 0,09023 kg | 0,18046 | Dados online |
| Curva PBA 90° 110mm | 4 und | 2,1522 kg | 8,6088 | Dados online |
| Bucha Ferro Galvanizado 2 1/2 X 1 1/2 | 1 und | 0,000627 kg | 0,000627 | Dados online |
| Caixa Tipo Manilhas Com Tampa Para uso nos Registros | 2 und | 100 kg | 200 | Dados online |
| Caixa Tipo Manilhas Sem Tampa Para uso nos Registros | 2 und | 48 | 96 | Dados online |
| Grama em Placa Bacias 255m² | 1 und | 20 kg/m² | 5100 | Dados online |
| Terra Preta Colocação de Grama | 24 m³ | 1,2 kg/m³ | 28,8 | Dados online |

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

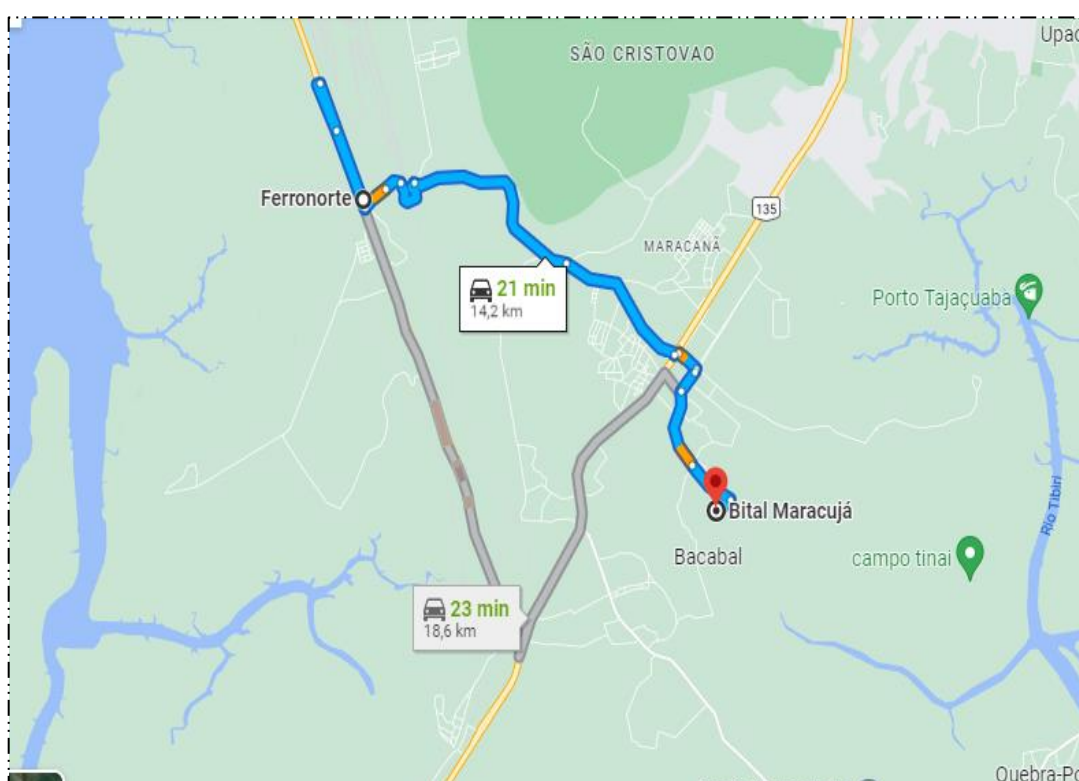
APÊNDICE 2

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ **Blocos de Concreto - 7,8 km**



➤ **Aço – 14,2 km**



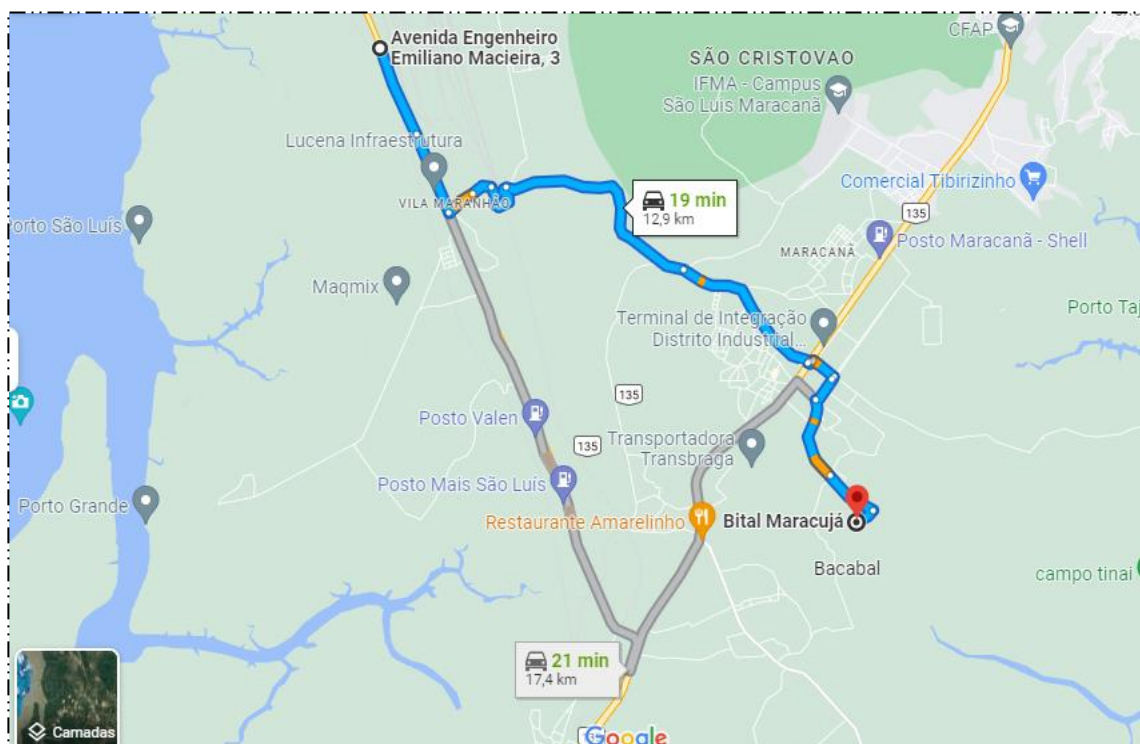
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

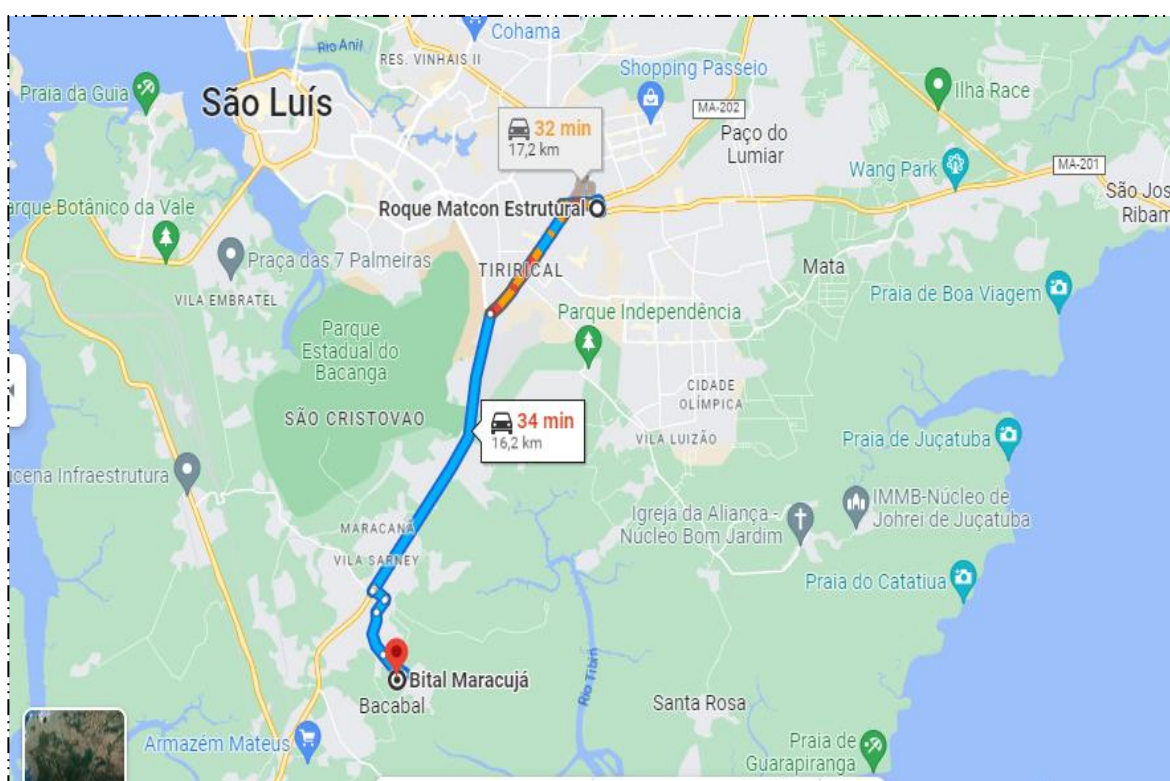
APÊNDICE 3

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ Madeira – 12,9 km



➤ Cimento – 16,2 km



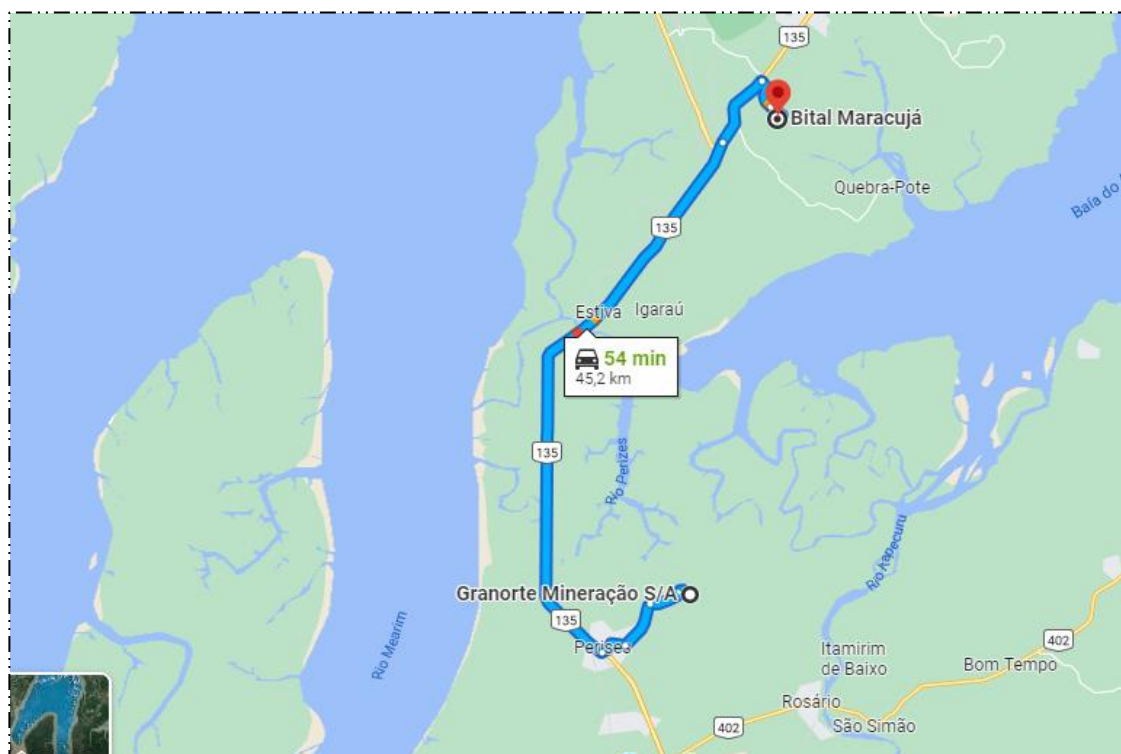
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

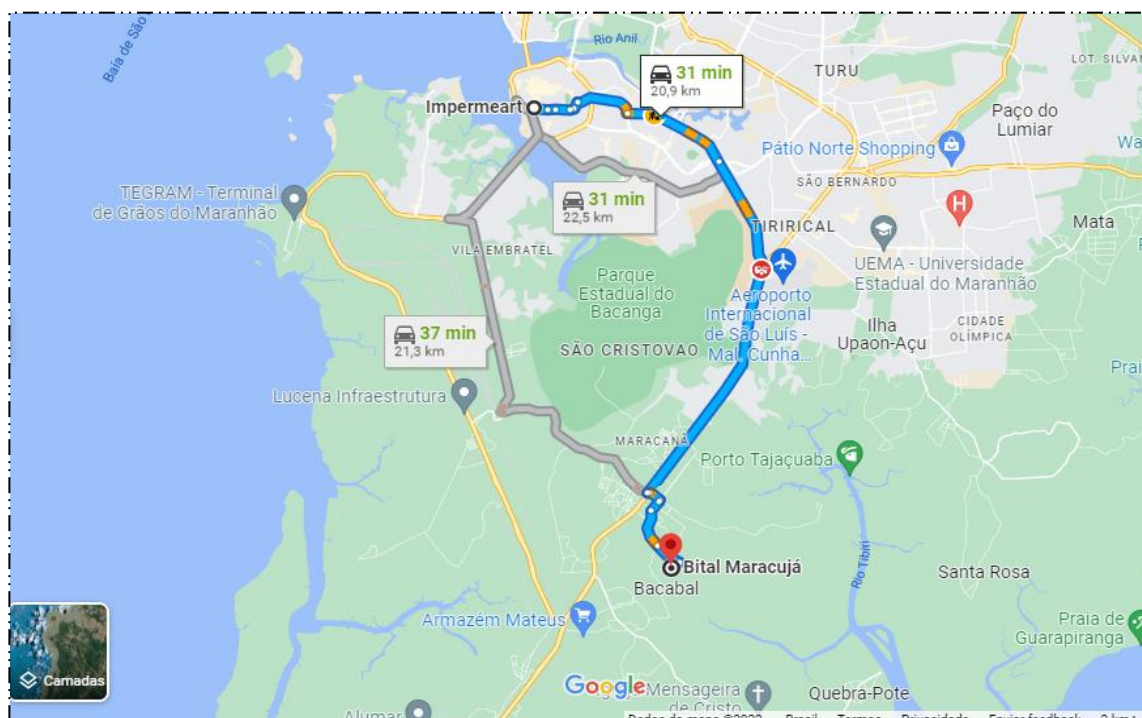
APÊNDICE 4

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ Brita – 45,2 km



➤ Manta Asfáltica – 20,9 km



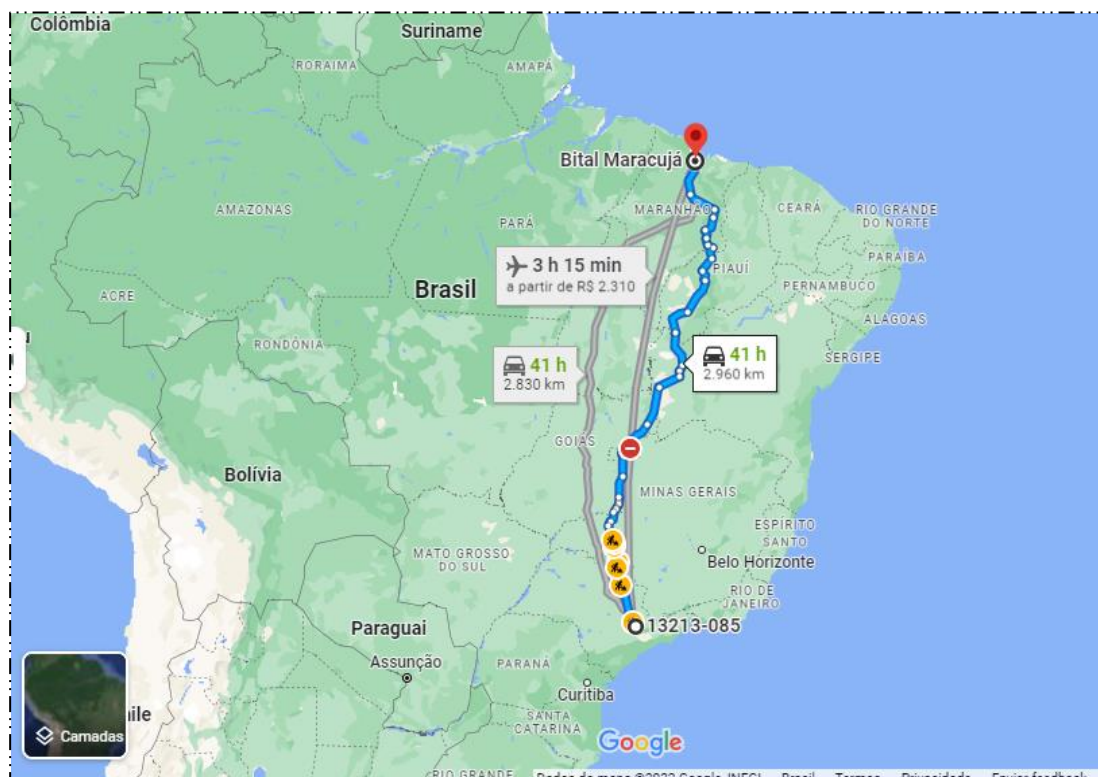
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

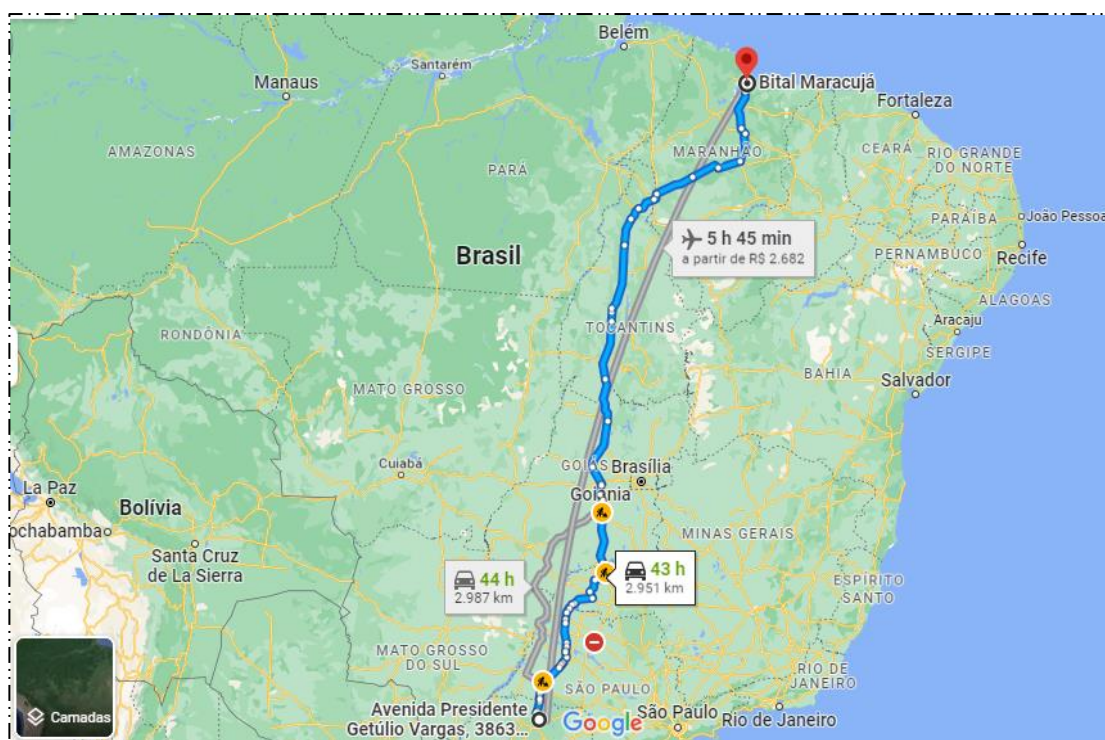
APÊNDICE 5

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ Geomembrana – 2.830 km



➤ Caixa Separadora – 2.951 km



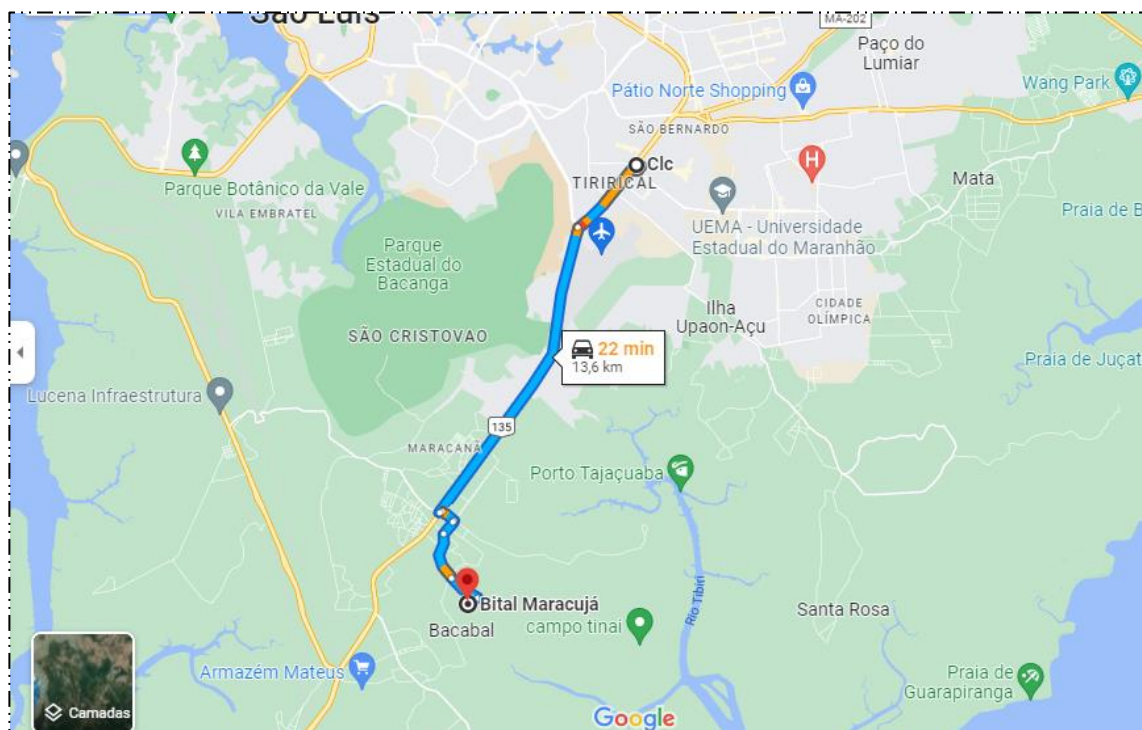
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

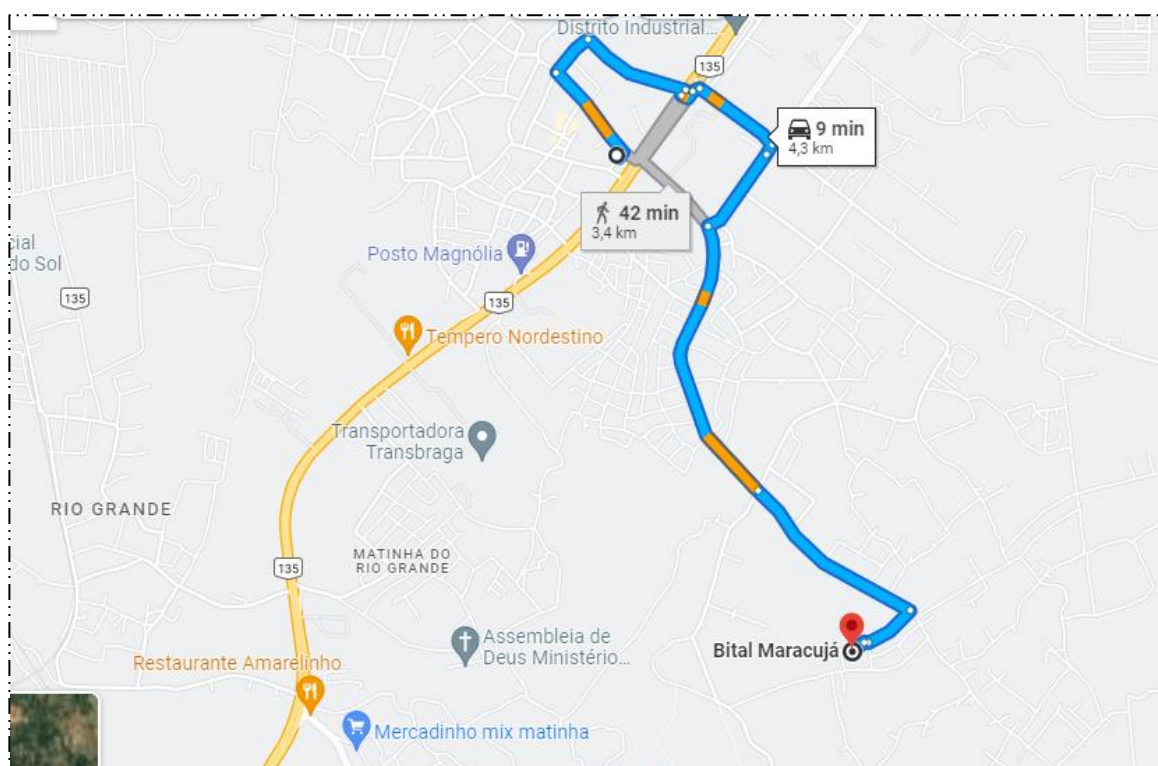
APÊNDICE 6

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ Tubos, Conexões e Registros – 13,6 km



➤ Cola – 3,4 km



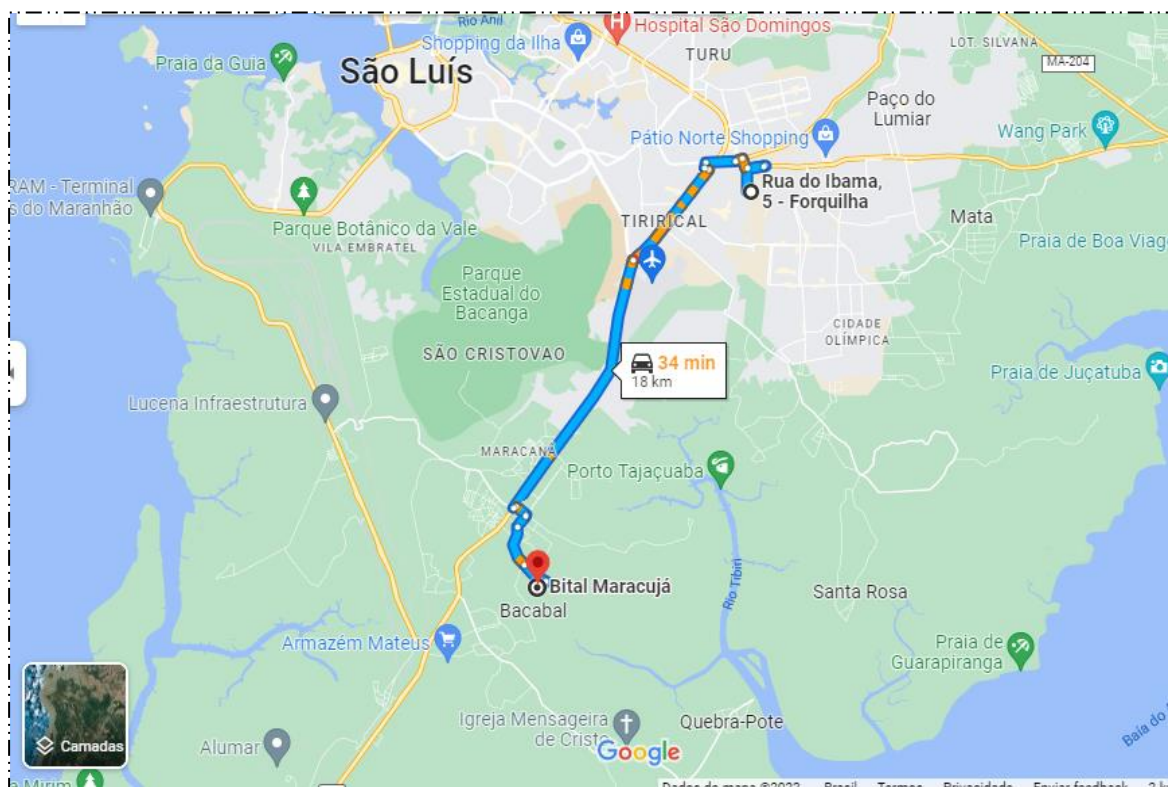
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

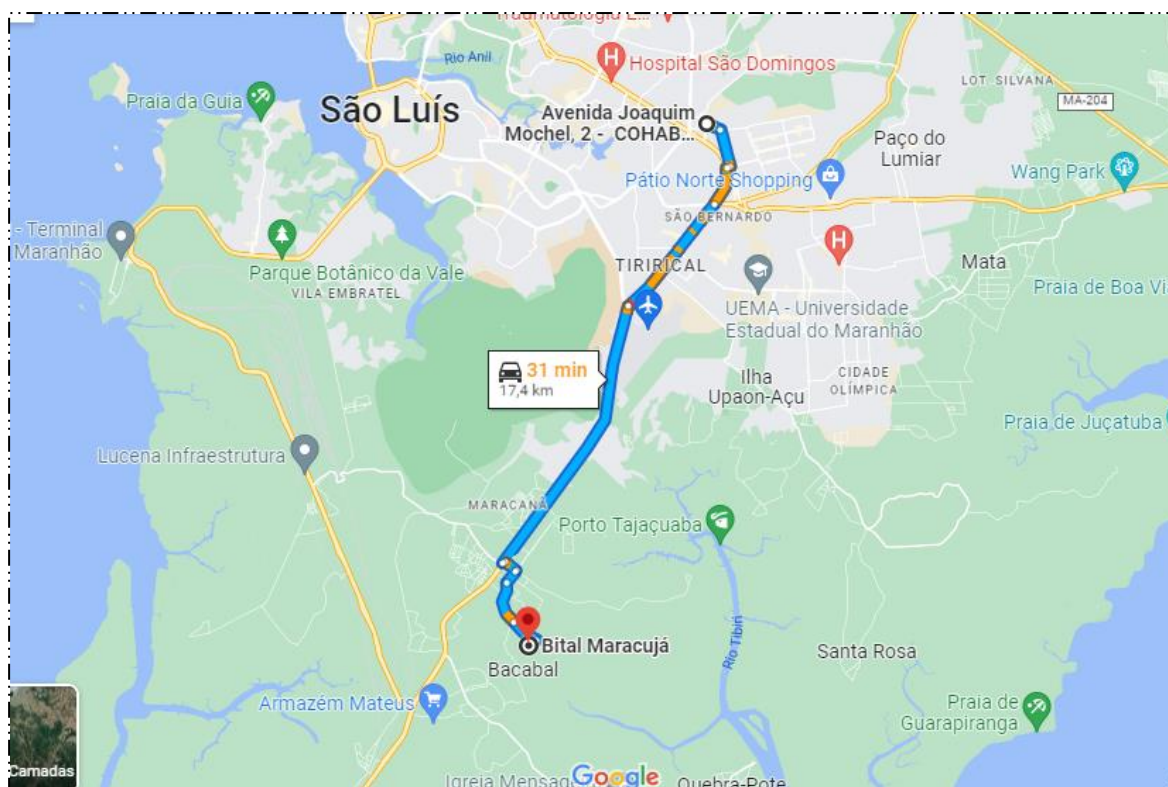
APÊNDICE 7

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ Grama – 18 km



➤ Terra Preta – 17,4 km

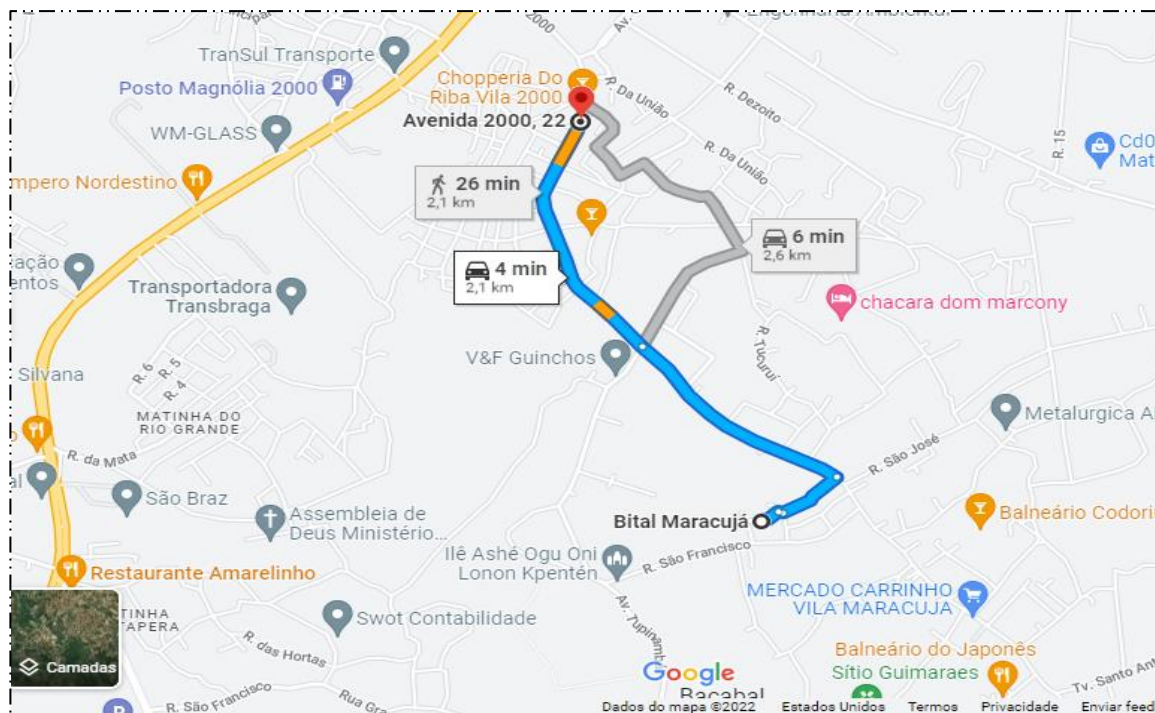


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

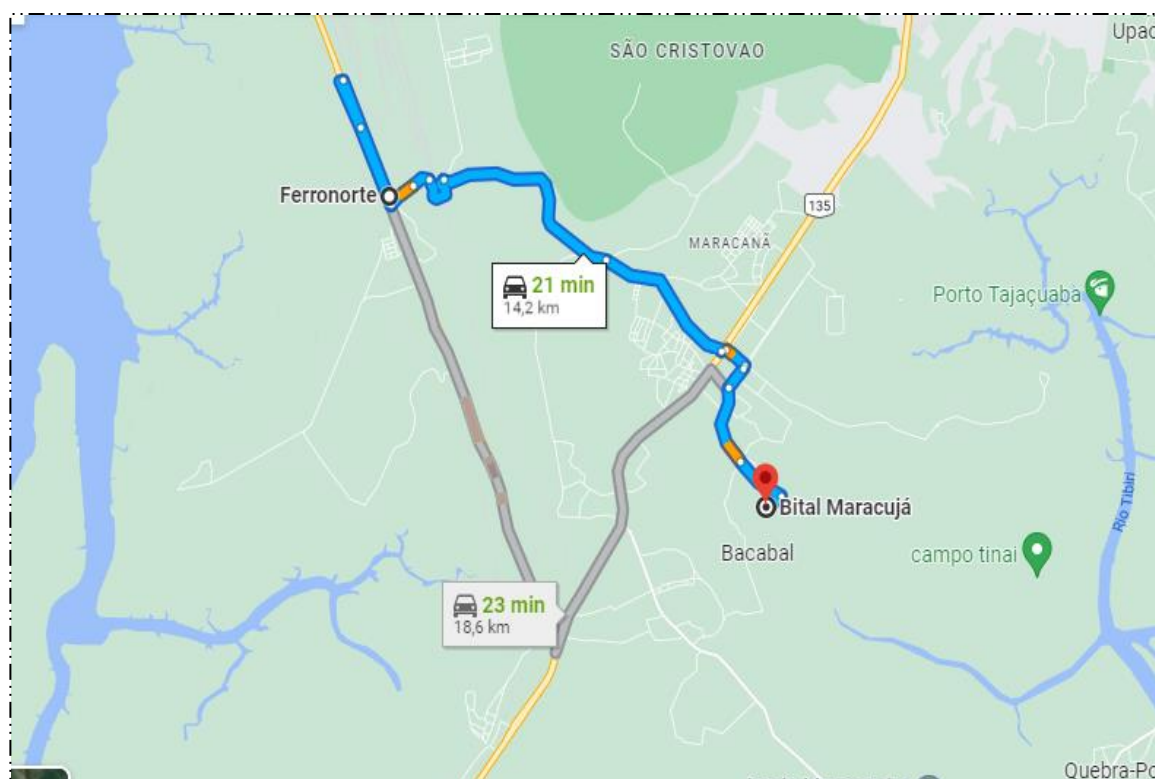
APÊNDICE 8

Rotas de Transportes de Materiais – Fornecedor até a ETE

➤ **Caixas pré-moldadas – 2,1 km**



➤ **Pregos – 14,2 km**





UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 9

Cálculo dos Transportes de Materiais

➤ Caminhão Basculante 20 m³

| Material | Peso(t) | Distância (km) | Produto (t.km) |
|----------|---------|----------------|----------------|
| Areia | 21,6 | 17,9 | 386,64 |
| Cimento | 6 | 16,2 | 97,2 |
| Brita | 16,608 | 45,2 | 750,6816 |

$$\sum \text{Produto} = 1.234,5216 \text{ t.km}$$

➤ Strada Hard Working 1.4. C.S

| Material | Peso(t) | Distância (km) | Produto (t.km) |
|-------------|-------------|----------------|----------------|
| Pregos | 0,004 | 14,2 | 0,0568 |
| PVC | 0,03473 | 13,6 | 0,472328 |
| Registros | 0,060000627 | 13,6 | 0,8160085272 |
| Cola | 0,000017 | 3,4 | 0,0000578 |
| Terra Preta | 0,0288 | 17,4 | 0,50112 |

$$\sum \text{Produto} = 5.371,172 \text{ t.km}$$

➤ Caminhão Toco Carroceria de madeira VW/12.170 BT

| Material | Peso(t) | Distância (km) | Produto (t.km) |
|---------------------|---------|----------------|----------------|
| Aço | 0,4238 | 14,2 | 6,01796 |
| Madeira | 0,13608 | 12,9 | 1,755432 |
| Manta Asfáltica | 0,45 | 20,9 | 9,405 |
| Grama | 5,1 | 18 | 91,8 |
| Caixas pré-moldadas | 0,296 | 2,1 | 0,6216 |

$$\sum \text{Produto} = 109,599992 \text{ t.km}$$

➤ Caminhão Munk Mercedes 1113 IDS-2336

| Material | Peso(t) | Distância (km) | Produto (t.km) |
|----------|---------|----------------|----------------|
| Blocos | 11,85 | 7,8 | 92,43 |

$$\sum \text{Produto} = 92,43 \text{ t.km}$$

➤ Caminhão ATEGO 2430

| Material | Peso(t) | Distância (km) | Produto (t.km) |
|------------------|---------|----------------|----------------|
| Geomanta | 1,875 | 2830 | 5306,25 |
| Caixa separadora | 0,022 | 2951 | 64,922 |

$$\sum \text{Produto} = 1,846314327 \text{ t.km}$$



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 10

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Depleção Abiótica (combustíveis fósseis) | Total - MJ |
|---|-------------------|
| GEOMEMBRANA | 0,0917 |
| PVC | 0,00144 |
| REGISTROS | 0,000106 |
| COLA | 0,000000664 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,00108 |
| TERRA PRETA | 0,00000207 |
| CIMENTO | 0,0169 |
| AREIA | 0,00366 |
| BRITA | 0,00126 |
| PREGOS | 0,0000414 |
| BLOCOS | 0,00452 |
| AÇO | 0,00537 |
| MANTA ASFALTICA | 0,0146 |
| GRAMA | 0,00359 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,000153 |
| MADEIRA | 0,000341 |
| DIESEL | 0,0243 |
| GASOLINA | 0,000544 |
| VEÍCULO A | 0,000182 |
| VEÍCULO B | 0,000191 |
| VEÍCULO C | 0,000161 |
| VEÍCULO D | 0,00911 |
| VEÍCULO E | 0,00215 |



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 11

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Aquecimento Global utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Aquecimento Global | Total - Kg CO₂ eq |
|---------------------------|-------------------------------------|
| GEOMEMBRANA | 0,00295 |
| PVC | 0,00012 |
| REGISTROS | 0,0000160 |
| COLA | 0,0000000346 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,0000346 |
| TERRA PRETA | 0,000000426 |
| CIMENTO | 0,00357 |
| AREIA | 0,000256 |
| BRITA | 0,000101 |
| PREGOS | 0,00000478 |
| BLOCOS | 0,000601 |
| AÇO | 0,000649 |
| MANTA ASFALTICA | 0,000157 |
| GRAMA | 0,000484 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,0000230 |
| MADEIRA | 0,0000275 |
| DIESEL | 0,000230 |
| GASOLINA | 0,00000691 |
| VEÍCULO A | 0,0000136 |
| VEÍCULO B | 0,0000130 |
| VEÍCULO C | 0,0000109 |
| VEÍCULO D | 0,000623 |
| VEÍCULO E | 0,0000146 |



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 12

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Destruição da Camada de Ozônio utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Destruição da Camada de Ozônio | Total - Kg CFC -11 eq |
|---------------------------------------|------------------------------|
| GEOMEMBRANA | 0,0000000000783 |
| PVC | 0,0000000000106 |
| REGISTROS | 0,00000000000855 |
| COLA | 0,0000000000001 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,00000000000918 |
| TERRA PRETA | 0,00000000000203 |
| CIMENTO | 0,00000000021 |
| AREIA | 0,000000000438 |
| BRITA | 0,000000000143 |
| PREGOS | 0,0000000000233 |
| BLOCOS | 0,000000000538 |
| AÇO | 0,000000000314 |
| MANTA ASFALTICA | 0,000000000186 |
| GRAMA | 0,000000000385 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,0000000000165 |
| MADEIRA | 0,0000000000303 |
| DIESEL | 0,000000000313 |
| GASOLINA | 0,0000000000698 |
| VEÍCULO A | 0,0000000000204 |
| VEÍCULO B | 0,0000000000227 |
| VEÍCULO C | 0,0000000000192 |
| VEÍCULO D | 0,000000000108 |
| VEÍCULO E | 0,000000000256 |



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 13

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Ecotoxicidade Aquática Marinha utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Ecotoxicidade aquática marinha | Total - Kg 1,4 - DB eq |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| GEOMEMBRANA | 2,05 |
| PVC | 0,0262 |
| REGISTROS | 0,0098 |
| COLA | 0,0000432 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,0241 |
| TERRA PRETA | 0,00019 |
| CIMENTO | 0,452 |
| AREIA | 0,0846 |
| BRITA | 0,0553 |
| PREGOS | 0,0153 |
| BLOCOS | 0,122 |
| AÇO | 1,00 |
| MANTA ASFALTICA | 0,0824 |
| GRAMA | 0,22 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,0086 |
| MADEIRA | 0,0273 |
| DIESEL | 0,119 |
| GASOLINA | 0,00335 |
| VEÍCULO A | 0,0129 |
| VEÍCULO B | 0,0046 |
| VEÍCULO C | 0,00388 |
| VEÍCULO D | 0,224 |
| VEÍCULO E | 0,0518 |



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 14

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Acidificação utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Acidificação | Total - Kg SO₂ eq |
|---------------------|-------------------------------------|
| GEOMEMBRANA | 0,0000105 |
| PVC | 0,000000669 |
| REGISTROS | 0,000000137 |
| COLA | 0,00000000141 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,000000123 |
| TERRA PRETA | 0,00000000276 |
| CIMENTO | 0,00000765 |
| AREIA | 0,00000147 |
| BRITA | 0,00000167 |
| PREGOS | 0,0000000191 |
| BLOCOS | 0,00000240 |
| AÇO | 0,00000226 |
| MANTA ASFALTICA | 0,00000144 |
| GRAMA | 0,0000210 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,0000000761 |
| MADEIRA | 0,000000156 |
| DIESEL | 0,00000232 |
| GASOLINA | 0,0000000671 |
| VEÍCULO A | 0,0000000468 |
| VEÍCULO B | 0,0000000654 |
| VEÍCULO C | 0,0000000552 |
| VEÍCULO D | 0,00000153 |
| VEÍCULO E | 0,000000737 |



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APÊNDICE 15

AICV de Construção da ETE

- **Resultados da AICV para a categoria de Eutrofização utilizando o Método CML I-A baseline v3.06**

| Eutrofização | Total - Kg PO₄--eq |
|---------------------|--------------------------------------|
| GEOMEMBRANA | 0,00000270 |
| PVC | 0,0000000882 |
| REGISTROS | 0,0000000210 |
| COLA | 0,000000000473 |
| CAIXA SEPARADORA | 0,0000000317 |
| TERRA PRETA | 0,0000000151 |
| CIMENTO | 0,00000180 |
| AREIA | 0,000000353 |
| BRITA | 0,000000417 |
| PREGOS | 0,0000000121 |
| BLOCOS | 0,000000580 |
| AÇO | 0,00000121 |
| MANTA ASFALTICA | 0,000000190 |
| GRAMA | 0,00000612 |
| CAIXAS PRÉ-MOLDADAS | 0,0000000205 |
| MADEIRA | 0,0000000601 |
| DIESEL | 0,000000321 |
| GASOLINA | 0,0000000817 |
| VEÍCULO A | 0,0000000139 |
| VEÍCULO B | 0,0000000158 |
| VEÍCULO C | 0,0000000133 |
| VEÍCULO D | 0,000000348 |
| VEÍCULO E | 0,000000178 |