



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
CENTRO TECNOLÓGICO - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIA CORDEIRO ZANOTELLI
THALYA FORTUNA VIEIRA

**IMPACTOS AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO DE UM
ATERRO UTILIZANDO A FERRAMENTA DE
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: COMPARAÇÃO
ENTRE AGREGADOS CONVENCIONAIS E
SIDERÚRGICOS DO TIPO LD**

Vitória, ES

Fevereiro de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES

JULIA CORDEIRO ZANOTELLI

THALYA FORTUNA VIEIRA

**IMPACTOS AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO DE UM
ATERRO UTILIZANDO A FERRAMENTA DE
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: COMPARAÇÃO
ENTRE AGREGADOS CONVENCIONAIS E
SIDERÚRGICOS DO TIPO LD**

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rudiele Aparecida Schankoski

Coorientador: Eng. Diego Corrêa Magalhães

Vitória, ES

Fevereiro de 2023

JULIA CORDEIRO ZANOTELLI
THALYA FORTUNA VIEIRA

**IMPACTOS AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO DE UM ATERRO UTILIZANDO A
FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: COMPARAÇÃO ENTRE
AGREGADOS SIDERÚRGICOS E AGREGADOS CONVENCIONAIS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof.^a Dr.^a Rudiele Aparecida Schankoski
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Eng. Diego Corrêa Magalhães
ArcelorMittal Global R&D
Coorientador

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay
Universidade de São Paulo
Examinador externo

Eng. Nocy Oliveira da Silveira
ArcelorMittal Tubarão
Examinador Externo

VITÓRIA, 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos dar vida e saúde em todos os dias de nossas vidas para nos permitir essa realização, dando força e sabedoria durante a graduação.

Aos nossos queridos pais e familiares, que nos apoiaram e incentivaram durante toda formação. Agradecemos todo amor, carinho paciência e compreensão por eles oferecidos, que foram fundamentais para a conclusão desse projeto.

Aos nossos amigos e colegas de graduação, pelas alegrias e dificuldades compartilhadas nessa trajetória e por tornarem os momentos mais leves e divertidos.

A nossa orientadora, a professora Dr.^a Rudiele Aparecida Schankoski que mesmo estando em puerpério aceitou nos orientar e incentivar a cada dia que acreditássemos no nosso trabalho. Por sua paciência, dedicação e sabedoria nas orientações e por ser para nós um exemplo de professora e pesquisadora.

Ao nosso coorientador Eng. Diego Corrêa Magalhães que não mediu esforços para que esse trabalho fosse o mais completo possível. Sempre nos animando, encorajando e nos incentivando.

A empresa KAEME, em especial ao topógrafo Flávio Oliveira e a M^a Hully Carvalho Picoli por todos os dados fornecidos nesse estudo, bem como pela dedicação na apresentação dos projetos.

A Encilo soluções sustentáveis, em especial ao Dr. Edivan Cherubini e Dr. Henrique Souza Junior por toda dedicação e ensinamentos sobre a ferramenta OpenLCA.

Agradecemos também a parceria entre ArcelorMittal e UFES em especial ao Eng. Nocy Oliveira da Silveira, por disponibilizarem o agregado que utilizamos neste trabalho e pela parceria durante toda a execução.

Por fim, agradecemos a todos que de alguma forma nos ajudaram a atingir essa conquista.

RESUMO

ZANOTELLI, Julia Cordeiro; VIEIRA, Thalya Fortuna. **Impactos ambientais na construção de um aterro utilizando a ferramenta de avaliação do ciclo de vida: comparação entre agregados siderúrgicos e agregados convencionais.** 2023. Projeto de Graduação em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2023.

A cada ano que passa, a procura por soluções sustentáveis a fim de mitigar os possíveis impactos ambientais cresce, e novas formas de tecnologias são destinadas a essa finalidade. Dentre todos os setores, os que mais recebem esses tipos de inovações são também os que mais poluem, como por exemplo a construção civil e a indústria manufatureira, que, com a intensa globalização, apresentam crescimento a cada ano que passa. Reflexo disso é o caso da malha rodoviária brasileira, que, a cada ano, apresenta intenso crescimento de obras como implantação de rodovias, aterros e barragens. Nesse sentido, alinhar interesses da construção civil e de indústrias manufatureiras, por meio da avaliação do ciclo de vida de aterros com substituição de materiais não renováveis por coprodutos se mostra um estudo importante para reforçar ideias como a da economia circular. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é comparar os potenciais impactos ambientais de aterros sobre solos moles executados com agregado siderúrgico com os que são executados de forma convencional, ou seja, apenas com brita e argila, por meio de ferramentas para avaliação do ciclo de vida. Para isso, foi necessário o levantamento de dados de campo a fim de se estabelecer uma unidade funcional de um sistema de produto, sendo necessário também que seja feita a quantificação dos potenciais impactos ambientais gerados por meio do uso do software nesse caso foi utilizado o OpenLCA. Após isso, é possível que seja feita a comparação dos aterros em estudo do berço ao uso, ou seja, até a necessidade da primeira manutenção bem como a análise de sensibilidade e de normalização e ponderação para cada um dos sistemas de produto com o intuito de ao fim ser possível discutir a viabilidade de utilização de agregados siderúrgicos em obras de aterro, levando em consideração os seus potenciais impactos ambientais. Ao fim, os resultados obtidos confirmaram que o emprego do agregado siderúrgico em substituição ao agregado natural se mostra plenamente vantajoso, do ponto de vista ambiental e sustentável para as proposições avaliadas, quando a indústria se encontra à uma distância de até 187 km do local da obra. Além

disso, conclui-se que a avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta eficaz para compreender os potenciais impactos ambientais de um processo.

Palavras-chave: Agregado Natural, Agregado Siderúrgico, Avaliação do Ciclo de Vida; Aterro; Categorias de impacto.

ABSTRACT

In recent years, the search for sustainable solutions in order to mitigate possible environmental impacts has grown, and new forms of technologies are intended for this purpose. Among all sectors, those that most receive these types of innovations are also those that pollute the most, as is the case of civil construction and the manufacturing industry, which, with the intense globalization, present growth with each passing year. A reflection of this is the case of the Brazilian road network, which presents an intense growth of works every year, such as the implementation of highways, landfills and dams. Aligning the interests of civil construction and manufacturing industries, through the assessment of the life cycle of embankments with the replacement of non-renewable materials by co-products, is an important study to reinforce ideas such as the circular economy. Therefore, the objective of this work is to compare the environmental impacts of embankments on soft soils executed with steel aggregate with those that are executed in a conventional way, that is, only with gravel and clay, using tools for life cycle assessment. For this, it will be necessary to collect field data in order to establish a functional unit of a product system, it will also be necessary to quantify the environmental impacts generated through the use of the software, in which case OpenLCA will be used. After that, it is possible to compare the landfills under study from cradle to grave, as well as the sensitivity analysis and the analysis of normalization and weighting for each of the product systems in order to finally be able to discuss the feasibility of using steel aggregates in embankments works, taking into account their potential environmental impacts. In the end, the results obtained confirmed that the use of steel aggregate over natural aggregate is sustainable when the industry is at a distance of up to 187 km from the work site. In addition, it is concluded that the life cycle analysis is an effective tool to understand the environmental impacts of a process.

Keywords: Natural Aggregate, Steel Aggregate, Life Cycle Assessment; Embankment; Impact Categories

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma ACV	20
Figura 2 - Elementos das fases de AICV.....	34
Figura 3 - Argila	38
Figura 4 - Brita	39
Figura 5 – Agregado siderúrgico (escória LD)	41
Figura 6 - Sequência executiva de substituição de solo mole: (A) escavação e retirada de solo mole; (B) e (C) preenchimento da cava; (D) solo substituído, situação final.....	43
Figura 7 - Execução do aterro com agregado natural	49
Figura 8 - Execução do aterro com agregado siderúrgico.....	53
Figura 9 - Manta geotêxtil.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas de ACV	22
Tabela 2 - Matriz de qualidade.....	32
Tabela 3 - Lista de categorias.....	35
Tabela 4 - Inputs e outputs da remoção de solo mole do aterro com brita	56
Tabela 5 - Inputs e outputs da execução do bota-fora do aterro com brita	57
Tabela 6 - Inputs e outputs da produção da brita.....	59
Tabela 7 - Inputs e outputs da extração da argila para o aterro com brita	59
Tabela 8 - Inputs e outputs da execução do aterro com brita	60
Tabela 9 - Inputs e outputs da obtenção da escória	63
Tabela 10 - Inputs e outputs da extração da argila para o aterro com escória.	63
Tabela 11 - Inputs e outputs da execução do aterro com escória.....	64
Tabela 12 - Resíduos sólidos Argila	67
Tabela 13 - Resíduos sólidos brita.....	67
Tabela 14 - Resíduos sólidos agregado siderúrgico	68
Tabela 15 - Normalização e ponderação	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Crescimento dos trabalhos em ACV ao longo dos anos.....	22
Gráfico 2 - Aquecimento global	69
Gráfico 3 - Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	70
Gráfico 4 - Acidificação terrestre	71
Gráfico 5 - Ecotoxicidade terrestre	72
Gráfico 6 - Ecotoxicidade marinha	73
Gráfico 7 - Ecotoxicidade água doce.....	74
Gráfico 8 - Formação de material particulados finos	74
Gráfico 9 - Uso da terra.....	75
Gráfico 10 - Consumo de água	76
Gráfico 11 - Uso de recursos minerais escassos	77
Gráfico 12 - Eutrofização água doce	78
Gráfico 13 - Toxicidade humana carcinogênica	79
Gráfico 14 - Toxicidade humana não-carcinogênica	79
Gráfico 15 - Comparação entre métodos de AICV	82
Gráfico 16 - Análise de sensibilidade utilizando o método EN 15804 + A2 Method .	84
Gráfico 17 - Análise de sensibilidade utilizando o método EN 15804 + A2 Method .	85
Gráfico 18 - Análise de sensibilidade utilizando o método RECIPE 2016 MIDPOINT (H)	86
Gráfico 19 - Análise de sensibilidade utilizando o método RECIPE 2016 MIDPOINT (H)	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AANat	Aterro com agregado natural
AASid	Aterro com agregado siderúrgico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de carbono
COP 26	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura e Transportes
EMPA	<i>Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt</i> Laboratórios Federais Suíços de Ciência e Tecnologia de Materiais
GEE	Gases de efeito estufa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	Organização Internacional de Normalização
LCA	Life Cycle Assessment
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
NBR	Norma brasileira
TC - 207	Comitê Técnico para elaboração de uma série de normas relacionadas com a Gestão Ambiental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo geral	16
1.1.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Avaliação de ciclo de vida	18
2.2 História da ACV	20
2.3 Normatização	22
2.4 Fases da ACV	25
2.4.1 Definição de objetivo e escopo	27
2.4.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	28
2.4.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	33
2.4.4 Interpretação	35
2.5 Ferramentas computacionais	36
2.5.1 OpenLCA	36
2.5.2 SimaPro 8	37
2.5.3 Gabi 6	37
2.5.4 Umberto NXT	37
2.5.5 Quantis Suite 2.0	37
2.6 Aterro	38
2.6.1 Materiais	38
2.6.2 Aterro sobre solo mole	41
3 METODOLOGIA	46
3.1 Definição de objetivo e escopo	46
3.1.1 Visita a empresa executora de aterros	46
3.1.2 Sistema do produto	46
3.1.3 Software utilizado	53
3.1.4 Banco de dados	53
3.1.5 Métodos de AICV	54
3.1.6 Seleção das categorias de impacto	54
3.2 Análise de inventário	56

3.3	Normalização e ponderação.....	66
3.4	Ensaio laboratoriais	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Caracterização dos materiais	67
4.2	Avaliação de impacto e interpretação	68
4.2.1	Aquecimento global	68
4.2.2	Formação de ozônio	69
4.2.3	Acidificação	70
4.2.4	Ecotoxicidade	71
4.2.5	Material particulado	74
4.2.6	Uso da terra	75
4.2.7	Consumo de água	76
4.2.8	Uso de recursos minerais escassos	76
4.2.9	Eutrofização água doce	77
4.2.10	Toxicidade humana carcinogênica	78
4.2.11	Toxicidade humana não-carcinogênica	79
4.3	Normalização e ponderação	80
4.4	Comparação entre métodos de AICV	81
4.5	Análise de sensibilidade	83
4.5.1	Análise de sensibilidade - EN 15804 + A2 Method.....	83
4.5.2	Análise de sensibilidade - RECIPE 2016 MIDPOINT (H)	86
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	89
6	REFERÊNCIAS	90
7	APÊNDICES	100
7.1	APÊNDICE A - Aterro convencional.....	101
7.2	APÊNDICE B - Área de conformação do bota-fora	102
7.3	APÊNDICE C - Aterro com agregado siderúrgico	103
8	ANEXOS	104
	Anexo A: Relatório analítico argila	104
8.1	Anexo B: Relatório analítico brita	106
8.2	Anexo C: Relatório analítico agregado siderúrgico	108

1. INTRODUÇÃO

É fato que o setor da construção civil é responsável por uma significativa parcela dos impactos ambientais gerados mundialmente. De acordo com a The Eco Experts, no ano de 2022, as indústrias manufatureiras e da construção civil se encontravam em terceiro lugar no ranking como maiores poluidoras do mundo, contando com cerca de 6,3 bilhões de toneladas de GEE (gases de efeito estufa).

Além do histórico aumento da geração de poluentes em indústrias manufatureiras e da construção civil, a expansão da globalização ao longo dos anos também tem implicado diretamente no intenso desenvolvimento da infraestrutura rodoviária que conseqüentemente vem apresentando aumento na demanda de implantação de rodovias, aterros e barragens (MASSOCCO, 2017).

Esse desenvolvimento de malhas rodoviárias muitas vezes envolve a execução de aterros sobre solos de baixa consistência, os chamados solos moles, que, por apresentarem características como baixa resistência e elevada compressibilidade, dificultam a construção dessas rodovias, que acabam se tornando um grande desafio para engenharia civil uma vez que estão sujeitas à recalques prolongados (OLIVEIRA, 2021; MASSOCCO, 2017). Como forma de evitar possíveis problemas com esse tipo de aterro, faz-se necessário o conhecimento de técnicas que permitam utilizá-lo com segurança e que faça com que a obra possua aplicação viável.

Em obras de aterro sobre solos moles, o projetista necessita de uma série de conhecimentos tanto do ponto de vista da investigação do terreno e elaboração do projeto geotécnico quanto em relação ao gerenciamento da obra. Além disso, é imprescindível a realização de ensaios de sondagem geotécnica a fim de se obter conhecimento do perfil do subsolo ao longo das áreas selecionadas, bem como dos parâmetros de compressibilidade e resistência ao cisalhamento das camadas de solos moles (MARANGON, 2009).

Vale destacar que toda obra gera algum tipo de impacto ambiental, que vai desde a exploração de recursos não renováveis, transformação direta do ambiente em que a obra foi implantada, bem como seu entorno, e futuros reflexos que a obra pode causar no local implantado. No caso dos aterros, esse cenário não é diferente, uma vez que o primeiro impacto para a construção de um aterro sobre solo mole se

encontra na extração dos recursos naturais não renováveis que o constituem, nesse caso, a argila e a brita.

As argilas são materiais formados devido à decomposição do feldspato (mineral constituinte das rochas ígneas), sendo assim um material composto de grãos muito finos de silicatos, extraídas de jazidas e aplicadas na construção de aterros de forma natural e sem algum tratamento prévio (Ecycle, 2022). Já a brita, um dos agregados naturais mais utilizados atualmente, é obtida a partir da trituração de rochas, especialmente as graníticas, realizadas por pedreiras e posterior classificação granulométrica. De acordo com dados da Revista Grandes Construções (2022), o Brasil movimentou mais de 250 milhões de toneladas de brita apenas no ano de 2021.

De acordo com o Observatório Nacional de Transporte e Logística (2022), o Brasil possui uma extensão de 1.720.909 quilômetros de rodovias, entre federais, estaduais e municipais. Entretanto, apenas 12,4% dessa extensão é pavimentada e em sua grande maioria com pista simples. Com o tempo, a quantidade de rodovias pavimentadas cresce, e o Brasil como um país de elevada extensão territorial e modal rodoviário predominante, acaba explorando cada vez mais esses recursos não renováveis.

Surge nesse contexto a necessidade da conscientização e ação a respeito da proteção ambiental e dos impactos associados ao uso, exploração e fabricação de produtos, impulsionando o desenvolvimento de métodos que promovam melhor entendimento desses impactos, a fim de se obter tomadas de decisões ambientalmente conscientes. Atualmente, a principal técnica em desenvolvimento com esse objetivo é chamada de avaliação do ciclo de vida (ACV).

A ACV aborda aspectos sociais, potenciais impactos ambientais e econômicos, como o uso de recursos finitos e as consequências de sua utilização para o meio ambiente ao longo de todo ciclo de vida de um produto, isto é, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso até o tratamento pós-uso, o que é denominado análise do berço ao uso (NBR ISO 14040, 2009). Um estudo de ACV avalia todas as entradas e saídas de materiais bem como os impactos causados ao longo de sua vida útil de forma a compreender os efeitos ambientais gerados e auxiliar na tomada de decisões relativas à gestão ambiental de uma obra. O ciclo de vida de uma construção engloba desde a produção dos materiais, construção, uso, até a demolição e

reciclagem (CARVALHO, 2002). Alinhado à ideia de diminuir os impactos ambientais causados em processos da construção civil, o uso de resíduos ou coprodutos tem sido alvo de estudos em vários segmentos, a fim de integrar a economia circular nas obras de engenharia. Dentro desse contexto, sabe-se que durante a fabricação do aço há a geração de inúmeros coprodutos, entre eles a escória de aciaria LD (Linz Donawitz) que possui propriedades técnicas competitivas com as britas. Estima-se que para cada tonelada de aço gera-se aproximadamente 150 kg de escória de aciaria LD. De acordo com a ArcelorMittal Brasil (2021), os principais usos da escória de aciaria LD são base e sub-base rodoviária, lastro ferroviário, tratamento de efluentes domésticos, corretivo agrícola, aterros, drenos rodoviários, entre outros. Além disso, a geração de escórias não é somente um problema brasileiro, de acordo com Han et al. (2015), a Rússia produziu quantidades consideráveis de escórias, representando cerca de 15-20% da produção mundial de aço.

Dessa forma, alinhar os interesses de indústrias manufatureiras com os da construção civil mostra-se como uma solução muito interessante, de forma a possibilitar a implementação de uma economia circular em busca de um trabalho mútuo em prol da sustentabilidade, obtendo diminuição da exploração de materiais não renováveis, que são substituídos por coprodutos sem destinação específica. Nesse sentido, o presente trabalho buscou avaliar o ciclo de vida de aterros sobre solos moles, constituídos por agregados siderúrgicos, em substituição ao agregado natural, para verificar os potenciais impactos ambientais causados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é comparar os potenciais impactos ambientais de aterros substituindo o solo mole executados com agregado siderúrgico, com aterros convencionais (utilizando brita e argila), por meio da avaliação do ciclo de vida.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantar dados de campo das categorias de impacto a fim de se estabelecer uma unidade funcional;
- Quantificar por meio do emprego do software OpenLCA, os potenciais impactos ambientais gerados por ambos os casos;

- Realizar, com base nos resultados obtidos, a comparação dos aterros em estudo do berço ao uso;
- Conduzir uma análise de sensibilidade utilizando dois métodos de AICV (Recipe 2016 Midpoint (H) e EN 15804 + A2 Method);
- Aplicar uma análise de normalização e ponderação para cada um dos sistemas de produto;
- Discutir a viabilidade de utilização de agregados siderúrgicos em obras de aterro considerando os potenciais impactos ambientais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Avaliação de ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma metodologia reconhecida e usada mundialmente que busca organizar uma visão estruturada e abrangente de cada um dos sistemas de produção envolvidos na fabricação de um produto. A ACV permite uma visualização a respeito dos potenciais impactos resultantes de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, processo ou sistema sobre as atividades humanas, o meio ambiente e as reservas de recursos naturais (SOUZA et al., 2012).

A metodologia se inicia desde a extração do recurso natural passando por todos os processos de produção e distribuição. Além disso, inclui os impactos do uso pelos consumidores e da sua destinação final (reciclagem, compostagem, incineração, aterro ou lixão). A metodologia apresenta várias aplicações, podendo ser usada desde o desenvolvimento de produtos, cobrindo a rotulagem ecológica e regulação, até à definição de cenários de prioridades e de gestão ambiental (FERREIRA, 2004).

De acordo com Finnveden et al. (2009), a ACV aborda uma grande diversidade de impactos ambientais e pode incluir comparação entre categorias de impacto. Nesse sentido, a ferramenta tem como objetivo fornecer comparação entre matérias-primas, por exemplo, e avaliar os principais impactos ambientais. É notório que tal estudo possuirá muitas informações se apresentando muitas vezes como um estudo de alta complexidade, sendo assim, é imprescindível a utilização de softwares para tratamento de dados e procedimentos de cálculos a fim de verificar a validade e impacto da proposta.

Houschild et al. (2018) afirmam que a ACV tem natureza quantitativa e assim pode ser usada para comparar os impactos ambientais de diferentes processos e sistemas de produtos. Além disso, pode ser usado para avaliar quais produtos ou sistemas causam menor impacto ambiental ou para apontar os processos que mais ou menos contribuem para o impacto geral e, nesse caso, devem receber maior atenção. Os resultados de ACV são calculados em duas etapas (1) mapeamento de todas as emissões e usos de recursos e, se possível, as localizações geográficas destes, e (2) uso de fatores derivados de modelos matemáticos de causa/efeito para calcular os impactos potenciais sobre o meio ambiente dessas emissões e recursos.

Atualmente, é frequente observar medidas e ações a respeito das mudanças climáticas e emissões de CO₂, amplamente discutidas na COP 26 (Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021), por exemplo. No entanto, na maior parte dos casos, esses não são os únicos tipos de impactos ambientais possíveis na escala de produção. A fabricação de qualquer produto pode atingir o meio ambiente de formas distintas e com incontáveis impactos ambientais. Dessa forma, os fluxos de matéria e energia envolvidos no ciclo de vida de um produto são medidos e relacionados para diversas categorias de impactos ambientais. Ao final da ACV é possível interpretar quais os danos ou benefícios ambientais, sociais e econômicos da produção e uso de um produto ou serviço específico (IBICT, 2022).

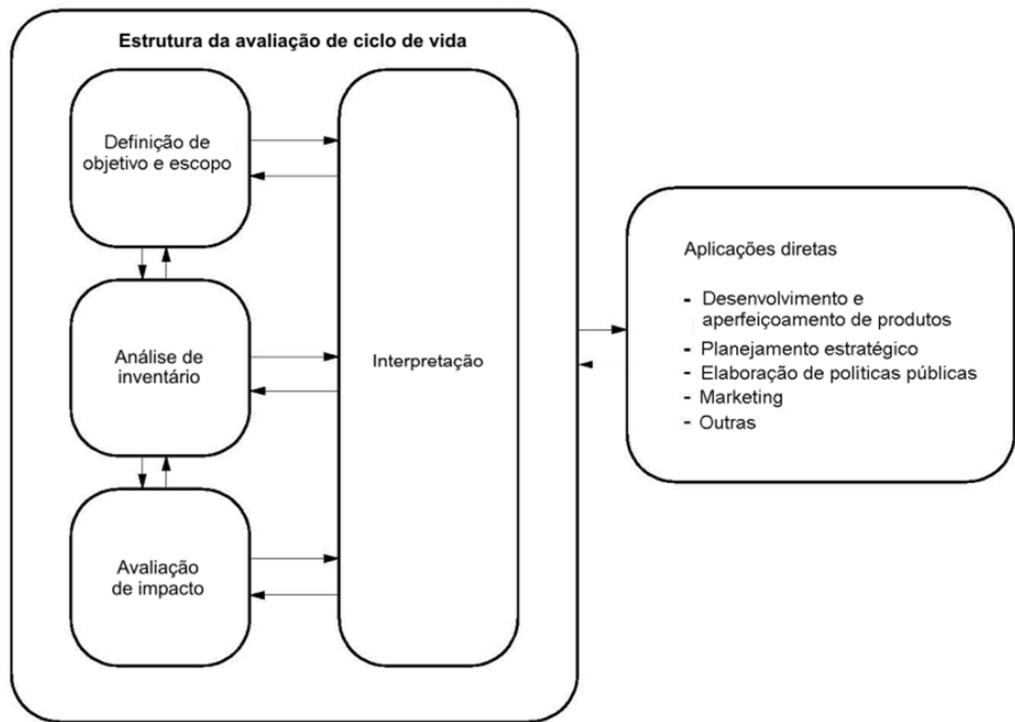
Sobre este último tópico, vale destacar que os Selos Verdes (europeus) e os Rótulos Ambientais (brasileiros) são na maior parte dos casos baseados em ACV's, o que impulsiona as empresas a buscarem um melhor gerenciamento e confiabilidade de dados do ciclo de vida de seus produtos.

De acordo com a NBR ISO 14040 (2014), um estudo de ACV é composto por quatro fases:

- a) a fase de definição de objetivo e escopo,
- b) a fase de análise de inventário,
- c) a fase de avaliação de impactos e
- d) a fase de interpretação.

O escopo de uma ACV, incluindo a fronteira do sistema e o nível de detalhamento, depende do objeto e do uso planejado para o estudo. A profundidade e a abrangência da ACV podem variar consideravelmente, dependendo da meta do estudo em questão (NBR ISO 14040, 2009). A Figura 1 apresenta a estruturação com as quatro fases da ACV.

Figura 1 - Fases de uma ACV



Fonte: NBR ISO 14040, 2009.

2.2 História da ACV

A avaliação do ciclo de vida foi desenvolvida pela primeira vez no final da década de 1960/início da década de 1970, durante a crise do petróleo. A população esperava na fila pela gasolina, e os custos de energia dispararam, as empresas buscavam maneiras de economizar em suas contas de energia, pois seus clientes estavam solicitando produtos energeticamente eficientes. Sendo assim, as empresas também começaram a usar a ACV internamente para melhorar seus produtos. E esse foi o início da mudança de paradigmas para que os primeiros inventários de ciclo de vida passassem a existir (GUINE, 2002).

Segundo Klöpffer (1997), a ACV ou LCA foi inventada por volta de 1970, no Midwest Research Institute nos Estados Unidos. Na Europa, o trabalho pioneiro do tipo ACV começou logo depois em Battelle Frankfurt, da Open University da Inglaterra, na EMPA na Suíça e pela Sundstrom na Suécia. O tema principal foi a análise comparativa de embalagens sob os aspectos ambientais, especialmente no que diz respeito à conservação de recursos e economia de energia.

De acordo com Prado et al. (2005), os primeiros estudos eram conhecidos como “análise de energia” e eram basicamente cálculos de balanços de massa e energia. Na sequência os estudos foram chamados de “análise de recursos” ou “análise de perfil ambiental”. Nos anos 80, a preocupação com o meio ambiente passou a aumentar. Como resultado, a nova metodologia passou a ser chamada de ecobalanco (ecobalance), ecoperfil (ecoprofile), análise de berço ao túmulo (cradle to grave), análise do ciclo de vida (life cycle analysis) ou avaliação do ciclo de vida (life cycle assessment).

Líderes e organizações ao redor do mundo passaram a ser cobrados, inclusive pelos seus clientes, por suas responsabilidades em impactos ambientais gerados nas etapas de seus processos e no produto final. A fim de criar um padrão que pudesse ser referência em todo o mundo, a ISO implantou em 1990 um comitê, TC - 207, para estudos e desenvolvimento de normas de gerenciamento ambiental, a série 14000. A primeira a ser editada em 1996 é a Norma ISO 14001, que a exemplo da ISO 9000 apresenta uma série de requisitos auditáveis de um sistema de gestão, neste caso, ambiental (TAVARES, 2006).

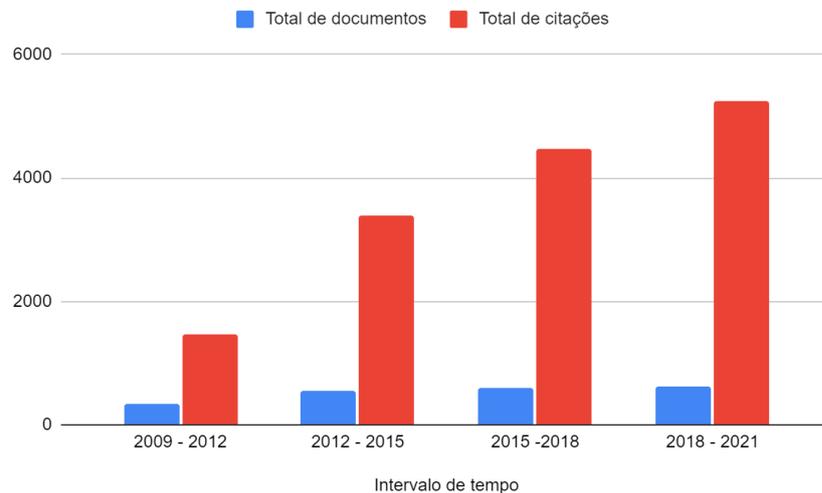
Segundo Hunt et al. (1996), nos primeiros anos, as ACVs eram geralmente encomendadas por clientes que estavam interessados principalmente nos aspectos de resíduos sólidos de sistemas totais de fabricação e uso, especialmente para produtos de embalagem. A energia e outras informações ambientais foram apenas um “bônus”. Por volta de 1975, o interesse se voltou para a energia. Em 1988, o interesse primário voltou aos resíduos sólidos, mas foi rapidamente substituído por uma preocupação mais equilibrada com as amplas áreas de uso de recursos e emissões ambientais. Esse interesse mais amplo desencadeou os atuais debates sobre avaliação de impacto.

No início dos anos 2000, as pesquisas sobre ACV no Brasil amparam-se nos estudos de outros países, que na maioria das vezes eram distantes da realidade nacional. Na mesma época, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) foi identificado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), como a instituição que dispunha de competência e ferramentas para a organização e disseminação de informação sobre ACVs, e assim, foi inaugurado os estudos sobre a temática no país (IBICT, 2022).

A aplicação da metodologia da ACV ganhou força com o passar dos anos, o que pode ser comprovado por meio de uma pesquisa rápida no banco de dados da Scopus, uma vez que ele apresenta mais de 12 mil artigos que contêm o termo “avaliação do ciclo de vida” em 2011, enquanto em 2021 esse número disparou, chegando à marca de 39.907 artigos (Scopus, 2022).

De acordo com a International Journal of Life Cycle Assessment (2023), foi verificado um crescimento dos documentos e trabalhos citados relacionados ao tema de avaliação do ciclo de vida. O Gráfico 1, apresenta os valores desse aumento a cada intervalo de 3 anos.

Gráfico 1 - Crescimento dos trabalhos em ACV ao longo dos anos



Fonte: Autoras, 2023.

2.3 Normatização

A Tabela 1 apresenta um resumo com as principais normas brasileiras relacionadas à Avaliação do Ciclo de Vida.

Tabela 1 - Normas de ACV

Norma	Ano	Título	Resumo

<p>ABNT NBR ISO 14040</p> <p>NORMA BRASILEIRA</p>	<p>2014</p>	<p>Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura</p>	<p>Aborda as fases de uma ACV:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a fase de definição de objetivo e escopo • a fase de análise de inventário, • a fase de avaliação de impactos e • a fase de interpretação.
<p>ABNT NBR ISO 14044</p> <p>NORMA BRASILEIRA</p>	<p>2014</p>	<p>Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações</p>	<p>Especifica requisitos e provê orientações para a realização da ACV</p>
<p>ABNT ISO/TR 14047</p> <p>RELATÓRIO TÉCNICO</p>	<p>2016</p>	<p>Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto</p>	<p>A normativa fornece exemplos para ilustrar a prática atual da avaliação de impacto do ciclo de vida de acordo com ABNT NBR ISO 14044:2009.</p>

<p>ABNT ISO/TS 14049</p> <p>RELATÓRIO TÉCNICO</p>	<p>2014</p>	<p>Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário</p>	<p>A normativa fornece exemplos sobre práticas para a condução de uma análise de inventário do ciclo de vida (ICV) como meio de se satisfazer determinadas disposições da ABNT NBR ISO 14044:2009.</p>
<p>ABNT ISO/TS 14071</p> <p>ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA</p>	<p>2018</p>	<p>Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009</p>	<p>A normativa fornece:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● detalhes de um processo de análise crítica, incluindo esclarecimento em relação à ABNT NBR ISO 14044:2009; ● diretrizes para a entrega do processo de análise crítica requerido, ligadas ao objetivo da (ACV) e a sua utilização; ● conteúdo e resultados do processo de análise crítica; ● diretrizes para melhorar a consistência, transparência, eficiência e credibilidade do processo de análise crítica; ● competências requeridas para o(s) analista(s) (interno, externo e membro do painel);

			<ul style="list-style-type: none"> • competências requeridas para ser representado pelo painel como um todo.
<p>ABNT ISO/TS 14072</p> <p>ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA</p>	2019	<p>Gestão Ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional</p>	<p>A normativa detalha:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a aplicação dos princípios e metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nas organizações; • os benefícios que a ACV pode trazer usando a metodologia de proposta. • a fronteira do sistema, • as considerações específicas ao lidar com ICV, AICV e interpretação, e • as limitações relativas aos relatórios, declarações ambientais e afirmações comparativas.

Fonte: Autoras, 2023.

2.4 Fases da ACV

Um estudo de ACV é estruturado por quatro fases principais:

- Definição de Objetivo e Escopo;
- Análise de Inventário;
- Avaliação de Impactos;
- Interpretação dos resultados.

Segundo Tavares (2006) e Guine (2002), a ACV possui muitas e significativas aplicações que dependem da interpretação de seus resultados e da magnitude dos dados levantados. Algumas aplicações citadas pelos autores são:

- A análise da origem de um problema relacionado à um produto ou serviço específico apoiando a tomada de decisões;
- O levantamento detalhado dos limites do processo de um produto incluindo insumos, transporte e descarte;
- A comparação de características ambientais e econômicas das variantes para um determinado produto, a orientação à tomada de decisões e prioridades para desenvolvimento de produtos e, ou, políticas ambientais, podendo também comparar sistemas semelhantes que oferecem o mesmo serviço/produto conforme definido pela unidade funcional;
- Na avaliação do desempenho ambiental, dados de pegada de carbono, determinação da energia embutida em um produto fazendo a identificação das oportunidades de melhoria dos aspectos ambientais globais do produto;
- Compreensão dos sistemas industriais envolvidos na fabricação de produtos e prestação de serviços para usuários finais visando otimizar sistemas industriais identificando operações dentro de uma cadeia de mercado que tem a maior oportunidade de melhoria;
- Garantir que as alterações feitas para melhorar uma parte de um sistema industrial não “transferem o fardo”, movendo um problema ou criando um em outra parte da cadeia;
- Informar os tomadores de decisão sobre os *trade-offs* que uma decisão terá sobre o balanço de impactos em todas as categorias de impacto ambiental, como, implementar uma tecnologia específica para reduzir GEE (gases de efeito estufa) emissões que podem resultar no aumento do uso de água;
- Indicar se um investimento de melhoria em uma parte de uma cadeia de mercado terá qualquer efeito de melhoria ao longo de todo o ciclo de vida;
- Benchmarking dos processos de uma organização em relação a uma média da indústria de processos semelhantes para identificar possibilidades de melhoria.

2.4.1 Definição de objetivo e escopo

Essa é a primeira etapa de uma ACV, na qual são definidos o objetivo e abrangência do estudo. A principal importância da etapa é assegurar a consistência do estudo de ACV em conformidade com a aplicação pretendida. Para isso, deve-se definir a aplicação do produto, o porquê deve-se conduzir o estudo e saber em qual das fases de produção é a mais poluente. Além disso, é de suma importância definir o público-alvo do estudo em questão (área de uma empresa) bem como se há a intenção de comparação do estudo com outros produtos.

De acordo com a NBR ISO 14040 (2014) a etapa de definição de escopo inclui os seguintes itens:

- o sistema de produto a ser estudado;
- as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- a unidade funcional;
- a fronteira do sistema;
- procedimentos de alocação;
- categorias de impacto selecionadas e metodologia para avaliação de impactos bem como a interpretação subsequente a ser utilizada;
- requisitos de dados;
- pressupostos;
- limitações;
- requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados;
- tipo de análise crítica, se aplicável;
- tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

De acordo com Guine (2002), na fase de definição de objetivo e escopo, é imprescindível a definição dos seguintes parâmetros:

- Precisão: Medida da variabilidade dos valores dos dados para cada categoria de dados expressa (por exemplo, variância);
- Completude: Porcentagem de relatórios de locais dados primários do número potencial existente para cada categoria de dados em um processo de unidade;

- Representatividade: Avaliação qualitativa do grau para o qual o conjunto de dados reflete a verdadeira população de interesse (ou seja, cobertura geográfica, período de tempo e cobertura tecnológica);
- Estimativa de tempo no processo de coleta de dados: O processo de coleta de dados primários é geralmente a parte longa de uma ACV. É importante encontrar o equilíbrio certo entre a quantidade de tempo e recursos para a precisão do estudo, com o objetivo de obter as informações mais adequadas para ajudar no seu processo de tomada de decisão;
- Consistência: Avaliação qualitativa de quão uniformemente a metodologia do estudo é aplicada aos vários componentes da análise;
- Reprodutibilidade: Avaliação qualitativa da extensão a qual informações sobre a metodologia e valores de dados permite que um profissional independente reproduza os resultados relatados no estudo.

2.4.2 Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise de inventário do ciclo de vida é a segunda etapa da ACV e consiste na coleta de dados ambientais e processos ao longo do ciclo de vida do produto bem como a quantificação das entradas e saídas do sistema. De acordo com Kulay et al. (2010), a terminologia “entradas e saídas” refere-se às correntes de matéria e de energia que circulam através das fronteiras que estabelecem os limites do sistema de produto em estudo. A maior parte das literaturas com enfoque em ACV atribue a esses termos o nome de aspectos ambientais, termo que na retórica normativa pode ser entendido como elemento das atividades, produtos e serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente.

Os dados ambientais são os elementos das atividades ou produtos de uma organização que podem interagir com o meio ambiente tal como o consumo de energia e emissões gasosas. A análise de fluxo de materiais e energia pode ser utilizada, por exemplo, para fornecer dados para estudo de ACV. Segundo Pereira et. al (2022), a análise do inventário trata da identificação dos processos que precisam ser avaliados realizando a captação de dados quantitativos de entradas e saídas, que envolvem o material (matéria-prima e produtos), energia e resíduos.

Com uma fronteira do sistema bem delimitada (elaborada na etapa de definição de objetivo e escopo), é possível identificar todas as etapas envolvidas nas etapas de

produção, e assim, quantificar todos os aspectos ambientais de cada uma destas etapas. Finalmente, o conjunto de dados irá compor o ICV do produto (Enciclo, 2022).

Segundo Ciclog (2022), a ICV é a etapa onde ocorre a coleta de dados e cálculo aplicados às entradas e saídas do sistema de produto em estudo. A coleta de dados é fundamental para garantir a veracidade do estudo e os cálculos têm como finalidade quantificar os fluxos e referenciá-los de acordo com a unidade funcional já definida na etapa anterior. O balanço de energia e massa é uma condição que garante a integridade e controle dos processos. Nessa etapa, faz-se necessário considerar os seguintes fatores:

- Fluxograma do sistema de produto;
- Procedimentos de cálculo;
- Procedimentos de alocação.

De acordo com Riva et al. (2021), a composição do inventário de ciclo de vida envolve a coleta e quantificação de todas as entradas (materiais, necessidade de energia etc.) e saídas (emissões no ar, na água etc.) dos sistemas examinados durante todo o seu ciclo de vida até o consumo e respectivo descarte final.

A etapa de ICV envolve basicamente 7 fases:

- Preparação para coleta de dados: O objetivo dessa etapa é assegurar a consistência do estudo com o objetivo definido;
- Coleta de dados: essa é a etapa mais longa de um estudo de ACV, isso porque geralmente envolve diversas áreas de uma empresa. Os dados coletados podem ser medidos, calculados ou até estimados, podendo ser de origem primária (obtidos diretamente), ou secundários (obtidos nas literaturas disponíveis ou banco de dados). A documentação sobre a origem dos dados é de extrema importância, a fim de se garantir a confiabilidade do estudo. Nessa fase da ACV, é preciso evitar a dupla contagem ou contagem falha de dados e realizar o procedimento de cálculos, conversões e indicadores de forma padronizada, além de informar a qualidade dos dados. Na impossibilidade de coleta de dados, é possível adotar um valor diferente de zero, desde que justificado ou ainda um valor calculado com base em valores disponíveis em processos elementares ou que empreguem procedimento/tecnologia análoga;

- Validação dos dados: etapa que visa verificar se os dados estão em conformidade com os objetivos propostos na etapa de definição de objetivo e escopo, é muito comum a utilização de referências bibliográficas que podem apontar inconsistências nos dados. Além disso, nessa fase são identificadas anomalias no balanço de massa ou no balanço energético cuja principal fundamentação está baseada na primeira lei da termodinâmica, que afirma que a variação do conteúdo energético de um sistema fechado é a diferença entre o calor fornecido a este e o trabalho realizado por ele;
- Correlação de dados aos processos elementares: é a etapa onde ocorre a alocação que pode ser feita fixando uma saída de produto para a qual todos os demais fluxos sejam referenciados. Segundo Coltro (2022), a alocação pode ser feita de duas formas: alocação física e econômica, preferencialmente utilizada. A alocação física está relacionada a todas as alterações quantitativas nos produtos ou em suas funções são correlacionadas com mudanças nos fluxos de entrada e saída do sistema. Já a alocação econômica é a divisão baseada no valor econômico dos produtos obtidos como reflexo de seus preços relativos;
- Correlação de dados à unidade funcional: de acordo com Coltro (2022), a unidade funcional é a unidade de referência quantitativa em que todos os fluxos de entradas e saídas da ACV se relacionam. A alocação é o método utilizado para dividir a carga ambiental de um processo entre os diversos produtos nele gerados;
- Agregação dos dados: fase em que ocorre o agrupamento de substâncias equivalentes com potencial de impacto ambiental semelhante. Nessa etapa é imprescindível verificar se o método de impacto ambiental é capaz de trabalhar no nível de agregação adotado;
- Refinamento da fronteira do sistema: é a etapa onde ocorre a revisão da fronteira do sistema com base nos critérios de corte estabelecidos no escopo. Além de inclusão de novos procedimentos elementares.

2.4.1.1 Base de dados

A base de dados se refere ao conjunto de dados inter-relacionados e organizados de forma a permitir a interpretação das informações cuja finalidade é gerir vastos conjuntos de informações de modo a facilitar a organização, manutenção e

pesquisa de dados. A primeira etapa de um ciclo de desenvolvimento de base de dados envolve a coleta de informações necessárias.

Nesse sentido, faz-se necessário também a criação de um banco de dados para abrigar inventários de ciclo de vida chamado de banco nacional de inventários de ciclo de vida (SICV Brasil). Tal sistema realiza o gerenciamento de bases de dados que armazena um conjunto de inventários brasileiros, resultando em aumento da competitividade da indústria nacional vinculado a um melhor desempenho ambiental de produtos e serviços (IBICT, 2022).

2.4.1.2 Qualidade dos dados

Assim como toda fonte de informação base para fomentar uma pesquisa, os dados de uma avaliação do ciclo de vida devem ser selecionados de forma a apresentar a melhor proximidade com os processos e fluxos reais, entretanto, a falta de dados muitas vezes faz com que seja necessário que sejam aplicados dados que não correspondem à realidade estudada. A fim de contornar esse problema, existe a matriz de pedigree. Ela aprofunda a metodologia de aprimoramento de dados coletados, sejam eles obtidos por meio de medições diretamente no meio ou obtidos por meio da literatura, como forma de reduzir a influência de incertezas epistêmicas (DEUTSCH, 2018).

Assim, a matriz de pedigree é capaz de permitir ao analista a transcrição na forma quantitativa, a partir da descrição qualitativa dos aspectos relevantes de um objeto do estudo (DEUTSCH, 2018).

De acordo com Ferreira (2004), os requisitos de qualidade dos dados especificam, de maneira geral, as características dos dados necessários para o estudo. Os requisitos de qualidade dos dados devem ser definidos de forma que sejam atingidos os objetivos e âmbito do estudo ACV. Os requisitos de qualidade dos dados devem referir (ISO 14040):

- cobertura temporal;
- cobertura geográfica;
- cobertura tecnológica;
- precisão, integridade e representatividade dos dados;
- consistência e reprodutibilidade dos métodos utilizados ao longo da ACV;

- fontes dos dados e sua representatividade;
- incerteza da informação.

Nos casos em que o estudo é utilizado para suportar uma declaração comparativa que é revelada ao público, os requisitos de qualidade dos dados apresentados anteriormente devem ser referidos. A Tabela 2 apresenta a matriz de qualidade de dados, onde cada parâmetro recebe uma pontuação de 1 a 5, no qual 1 representa maior grau de qualidade do indicador e 5 o menor.

Tabela 2 - Matriz de qualidade

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5
Indicadores, que são independentes do estudo em que os dados são aplicados:					
Confiabilidade da fonte	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente com base em suposições ou dados não verificados com base em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em suposições	Estimativa qualificada (por exemplo, por especialista industrial)	Estimativa não qualificada ou origem desconhecida
Completeness	Dados representativos de uma amostra suficiente de locais durante um período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados representativos de um número menor de sites, mas por períodos adequados	Dados representativos de um número adequado de sites, mas de períodos mais curtos.	Dados representativos, mas de um número menor de sites e períodos mais curtos ou dados incompletos de um número adequado de sites e períodos	Representatividade desconhecida ou dados incompletos de um número menor de sites e/ou de períodos mais curtos
Indicadores relativos às condições tecnológicas e naturais de produção sob as quais os dados são válidos e, portanto, dependente das metas de qualidade de dados para o estudo em que os dados são aplicados:					

Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano de estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade dos dados desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios de área maior na qual a área em estudo está incluída	Dados de área com condições de produção semelhantes	Dados de área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de área desconhecida ou área com condições de produção muito diferentes
Correlação tecnológica adicional	Dados das empresas, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo, mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais em estudo, mas de tecnologia diferente	Dados sobre processos ou materiais relacionados, mas da mesma tecnologia	Tecnologia desconhecida ou dados sobre processos ou materiais relacionados, mas de tecnologia diferente

Fonte: Adaptado de Weidema, 1998.

2.4.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

Na penúltima etapa da ACV os dados coletados na etapa anterior (ICV) serão transformados em indicadores de potencial impacto ambiental. Segundo com NBR ISO 14040 (2014), os resultados da ACV podem ser subsídios úteis para uma variedade de processos decisórios. A etapa de AICV se fundamenta na avaliação do sistema de produto, em função de seus aspectos ambientais, a partir dos dados do inventário (SILVA et al., 2006).

De acordo com a Ciclog (2022), a AICV avalia a significância dos impactos potenciais de um sistema de produto, utilizando os dados obtidos na etapa anterior. Nessa etapa, é imprescindível se atentar à transparência dos pressupostos e considerar aspectos como subjetividade nas análises ou diferenças entre indicadores e impactos. Essa etapa deve conter, obrigatoriamente, os seguintes elementos:

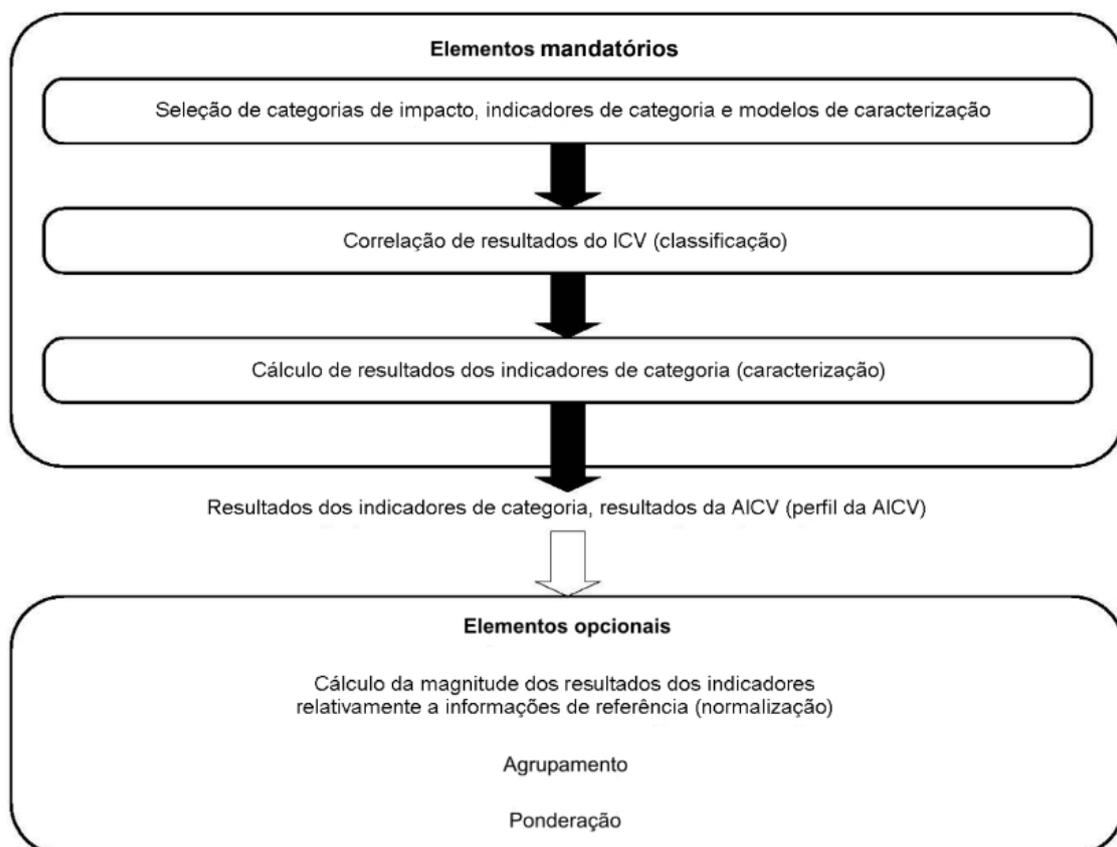
- Escolha das categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização;
- Classificação dos resultados do ICV;
- Cálculos de caracterização.

Ainda de acordo com a NBR ISO 14040 (2014), a subdivisão da fase de AICV em diferentes elementos é útil e necessária por uma série de razões, como segue:

- a) cada elemento da AICV é distinto e pode ser claramente definido;
- b) a fase de definição de objetivo e escopo de uma ACV pode considerar cada elemento da AICV separadamente;
- c) uma avaliação da qualidade dos métodos, pressupostos e outras decisões da AICV podem ser conduzida para cada um de seus elementos;
- d) procedimentos, pressupostos e outras operações da AICV dentro de cada elemento podem ficar transparentes para a análise crítica e comunicação;
- e) o uso de valores e subjetividade (a partir de agora chamado escolha de valores) dentro de cada elemento pode ficar transparente para a análise crítica e comunicação.

O nível de detalhamento, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias utilizadas dependem do objetivo e escopo do estudo. A Figura 2 exibe um resumo da fase de AICV.

Figura 2 - Elementos das fases de AICV



Fonte: NBR ISO 14040, 2014.

De acordo com a Tabela 3, as categorias podem ser classificadas em relação a entradas e saídas abrangendo a maioria dos problemas ambientais conhecidos hoje.

Tabela 3 - Lista de categorias

Categorias de impacto de acordo com a SETAC-Europa	
A: Categorias relacionadas a esgotamento de recursos ou competição	B: Categorias relacionadas à saída ("poluição")
Recursos abióticos (depósitos, fluxos) Recursos bióticos Terra	Gases de efeito estufa Depleção do ozônio estratosférico Impactos toxicológicos humanos Impactos ecotoxicológicos Formação foto-oxidante Acidificação Eutrofização (incluindo BaD e calor) Odor Ruído Radiação Vítimas

Fonte: Adaptado de Klöpffer, 1997.

2.4.4 Interpretação

É a última etapa da ACV e consiste em um procedimento sistemático para identificar, qualificar, conferir, avaliar e apresentar conclusões de acordo com os resultados encontrados no estudo. Apesar dessa etapa ser realizada desde o início da ACV, nessa etapa pode-se fazer uma interpretação dos resultados do AICV, através de análise de incertezas e análise de sensibilidade, entre outras. A interpretação é um processo iterativo que permite revisar e rever as definições iniciais, bem como a qualidade e a natureza dos dados coletados, de forma a atingir o objetivo do estudo.

De acordo com Pereira et al. (2022), é na fase de interpretação que estão contidas as informações a respeito da conclusão, verificação e avaliação da confiança de dados fundamentados de acordo com as etapas anteriores.

Segundo a NBR ISO 14040 (2014), a interpretação é a fase da ACV em que são consideradas em conjunto as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto; no caso de estudos de ICV, apenas as conclusões da análise de inventário serão consideradas. Vale destacar que a fase de interpretação da ACV

fornece resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos inicialmente e que levem a inferências, expliquem limitações e forneçam recomendações.

Segundo Silva et al. (2000), a análise global da dimensão ambiental do sistema busca responder às questões formuladas no escopo da Avaliação de Ciclo de Vida. A estruturação do inventário de fluxos permite averiguar a(s) fase(s) que geram maior impacto, identificar as oportunidades para reduzir emissões de resíduos, consumo energético, emissão de CO₂ e uso de materiais e propor alternativas para diminuição dos impactos negativos identificados.

2.5 Ferramentas computacionais e banco de dados

Para garantir a confiabilidade em um estudo de ACV, uma das etapas consiste no levantamento de dados de fluxo de matéria e energia ao longo de todo o ciclo de vida e a correlação desses dados com os impactos ambientais. Dependendo do escopo e abrangência definidos para o estudo, esses itens geram um grande volume de informações e de cálculos que demandam a utilização de ferramentas computacionais (Enciclo, 2022).

Na atualidade, já existem no mercado diversos tipos de softwares para a realização de ACVs. De forma geral, os softwares contêm bancos de dados com informações referentes a diversos processos produtivos (matérias-primas, energia, transporte, resíduos, entre outros) que podem ser escolhidos pelo pesquisador para a elaboração de um sistema de produto relacionando esses processos às respectivas categorias de impacto ambiental. Por fim, o software apresenta os índices de impacto ambiental do produto de cada uma das categorias escolhidas (Enciclo, 2022).

A seguir são apresentados os principais softwares disponíveis no mercado para realização de estudos de ACV.

2.5.1 OpenLCA

Esse é um software gratuito para Avaliação de Sustentabilidade e Ciclo de Vida, e de acordo com openLCA (2022), conta com os seguintes recursos:

- Cálculo rápido e confiável de sua Avaliação de Sustentabilidade e/ou Avaliação de Ciclo de Vida;

- Insights muito detalhados sobre os resultados de cálculo e análise; identificar os principais direcionadores ao longo do ciclo de vida, por processo, fluxo ou categoria de impacto, visualizar resultados e localizá-los em um mapa;
- Os melhores recursos de importação e exportação da classe; fácil de compartilhar seus modelos;
- Custeio do Ciclo de Vida e avaliação social suavemente integrados no modelo de ciclo de vida;
- Amigo do usuário; interface do usuário em vários idiomas;
- Repositório avançado e eficiente e recurso de colaboração (desenvolvido atualmente);
- Melhoria contínua e implementação de novas funcionalidades.

2.5.2 SimaPro 8

De acordo com ACV Brasil (2022), o SimaPro foi desenvolvido pela empresa Pré Sustainability e lançado em 1990, e conta com usuários em mais de 80 países, sendo o software mais utilizado para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no mundo. É uma ferramenta que possibilita a coleta de dados e análise do desempenho ambiental de produtos e serviços além da modelagem de ciclos de vida complexos de forma sistemática e transparente, seguindo as recomendações da série ISO 14040 (2014).

2.5.3 Gabi 6

O GaBi 6 tem uma interface intuitiva e possibilita a visualização dos processos em forma de fluxograma. Assim, é possível perceber com precisão os pontos de eficiência ou de geração de impactos ambientais (Enciclo, 2022).

2.5.4 Umberto NXT

O software possibilita a integração das análises de ciclo de vida com custos. Além disso, possui vários datasets para suportar a modelagem. Por fim, é possível criar inventários com dados coletados, de modo com que representem melhor o cenário que está avaliando (ACV Brasil, 2022).

2.5.5 Quantis Suite 2.0

Segundo Enciclo (2022), esse programa foi desenvolvido pela empresa Quantis e seu grande diferencial é a possibilidade de realização de análises de Pegada Hídrica dos produtos.

2.6 Aterro

2.6.1 Materiais

Segundo Arteris (2019), os materiais utilizados na construção dos aterros devem ser originários das escavações referentes à execução dos cortes e da utilização de empréstimos. Tais materiais devem ser caracterizados de acordo com as normas técnicas vigentes e devem atender aos requisitos mecânicos e físicos.

2.6.1.1 Argila

De acordo com Kulaif (2012), as argilas são formadas a partir da transformação (principalmente intemperismo) dos minerais mais comuns da crosta (Fe, Mg, Na, K, Ca). O material pode ser definido como rocha constituída por partículas muito finas e vários minerais tais como os silicatos sendo utilizado para enchimentos, como no processo de aterro. A Figura 3 apresenta um exemplo de argila na jazida.

Figura 3 - Argila



Fonte: Wienerberger, 2022.

A extração do material causa diversos impactos ambientais como: desequilíbrios ecológicos e agrícolas, erosão, assoreamento dos rios e lagos, desmatamento (ALMEIDA, 2020). Por isso, o controle de exploração de jazidas deve ser executado com a devida atenção, no sentido de que a retirada de material de empréstimo não resulte em superfícies muito íngremes, com grandes desníveis, o que dificultaria a apropriada recuperação dessas áreas. A exploração por meio de superfícies parametrizadas constitui-se uma técnica a ser adotada em todo processo de extração de matérias de empréstimos (ALMEIDA; MARQUES, 2014).

A revegetação, cujo principal objetivo é propiciar a cobertura eficiente do solo, protegendo-o da erosão e favorecendo a recuperação e suas propriedades físico-químicas, deve, inicialmente, contemplar o desenvolvimento de espécies herbáceas e

arbustivas, vindo a favorecer a formação de vegetação arbórea, recuperando parte da vegetação existente (ALMEIDA; MARQUES, 2014).

As espécies vegetais a serem utilizadas para a revegetação devem ser preferencialmente gramíneas e leguminosas, que fixam nitrogênio no solo, além de espécies arbustivas e arbóreas (GUERRA; da SILVA; BOTELHO, 2010).

O solo orgânico proveniente da limpeza e desmatamento deverá ser estocado adequadamente fora da área trabalhada para efeito de reaproveitamento futuro, como revestimento vegetal de superfícies a serem recuperadas (ALMEIDA; MARQUES, 2014).

2.6.1.2 Agregado natural

O agregado natural é aquele oriundo de jazidas podendo ser britado ou não. Um dos agregados mais utilizados na construção civil é popularmente conhecido como brita. Segundo Instituto Minere (2020), os variados tipos de brita estão entre os materiais mais importantes para a construção civil. Esse agregado é obtido por meio da trituração de rochas, que podem incluir basalto, granito, gnaisse e calcário. A brita é posteriormente classificada segundo a NBR 7211 (2022), de 0 a 5 (em ordem crescente), de acordo com o seu diâmetro, na qual as dimensões variam entre 4,8 e 152 mm (Grupo estrutural, 2018). A Figura 4 exibe um exemplo de brita.

Figura 4 - Brita



Fonte: Mapa da obra, 2016.

De acordo com Oliveira (2014), o processo de obtenção da brita é definido como conjunto de processos para fragmentar grandes blocos de rochas produzindo frações menores de diferentes granulometrias compatíveis para utilização direta ou para posterior beneficiamento. A britagem é um estágio no processamento de minérios, que utiliza em sucessivas etapas (britagem primária, secundária e terciária)

dispondo de equipamentos apropriados para a redução até os tamanhos requeridos para cada aplicação.

2.6.1.3 Agregado siderúrgico

De acordo com Araújo et al. (2015), uma usina siderúrgica gera aproximadamente 100 kg de escória LD (oriunda do convertedor Linz-Donawitz) por tonelada de aço líquido produzido. São coprodutos siderúrgicos obtidos do beneficiamento das escórias, os quais possuem características técnicas capazes de substituir agregados naturais não renováveis como brita, areia e solos em diversas aplicações.

O processo de obtenção da escória LD é bem semelhante entre as empresas siderúrgicas. Segundo procedimentos da ArcelorMittal Brasil (2022), na aciaria é onde ocorre a transformação do ferro gusa em aço além do refino e adição de ferro-ligas para a transformação do aço líquido em placas. O ferro gusa proveniente dos altos-fornos após passar pelo processo de dessulfuração, é transferido do carro torpedo para a panela de gusa na aciaria. A pesagem e a coleta de amostras para análise química são realizadas e então o ferro gusa é transferido até o Skimmer através das pontes rolantes. No Skimmer, a escória remanescente da panela de gusa é removida e recolhida até o pote. Nesta etapa também é realizada a medição da temperatura do material para análise térmica. Em seguida a panela de gusa é transportada pelas pontes rolantes para o carregamento do ferro gusa nos convertedores. O convertedor é o equipamento responsável pela transformação do gusa em aço. A ArcelorMittal Tubarão possui convertedores do tipo LD (ArcelorMittal, 2022).

De acordo com Lima (2021), inicialmente é feita a forragem do convertedor, para em seguida realizar o carregamento de sucata metálica sólida com o auxílio das canaletas que são basculadas no convertedor. Por último é feito o carregamento do ferro gusa líquido pela panela de gusa que também é basculada no convertedor.

Após o carregamento da carga metálica é feito o sopro de oxigênio. Na fase inicial do sopro ocorre a oxidação do silício, carbono, manganês, enxofre e fósforo. Momentos antes do término do sopro a sub-lança desce ao convertedor e faz uma amostragem do aço determinando se é necessário realizar ajustes. Os gases gerados no processo são recuperados pelo sistema de limpeza de gases. Em seguida são utilizados para a geração de energia na área de utilidades. Ao final do processo do

sopro é realizado o vazamento do aço líquido na panela adicionando ferros-liga para ajuste da composição química final do aço pretendido (MOURÃO et al. 2007).

A escória formada durante o processo é vazada no pote de escória e seu resfriamento pode ser de forma lenta ao ar ou sob sprays de água. Na Figura 5 é possível observar a escória nos pátios de estocagem.

Figura 5 – Agregado siderúrgico (escória LD)



Fonte: Autoras, 2023.

2.6.2 Aterro sobre solo mole

De acordo com Machado (2012), existem várias alternativas para solucionar ou minimizar os problemas de recalques e de estabilidade em projetos em que se planeja a construção de aterro sobre solos moles. Geralmente, as soluções são selecionadas de forma que resolvam ambos os problemas. Além disso, é comum o uso de reforço com geossintético.

2.6.2.1 Substituição do solo mole por brita

Os solos moles são solos sedimentares com baixa resistência à penetração ($SPT < 4$). Em geral, são compostos por argilas moles, siltes e areias argilosas, fofas de deposição recente, isto é, formadas durante o período quaternário (MASSAD, 2003).

Conforme descrito por Almeida e Marques (2014), no processo de remoção do solo mole (Figura 6a) ocorre a retirada total do solo de baixa resistência, incluindo o transporte e bota-fora. Considera-se como “remoção de solo mole” o processo de

retirada de camadas de solos impróprios para utilização em aterros e como terreno de fundação, para qualquer obra de terra, mediante o emprego de equipamentos adequados. Nessa situação, a camada de solo mole deve ser totalmente substituída para de solos compressíveis até 4 m.

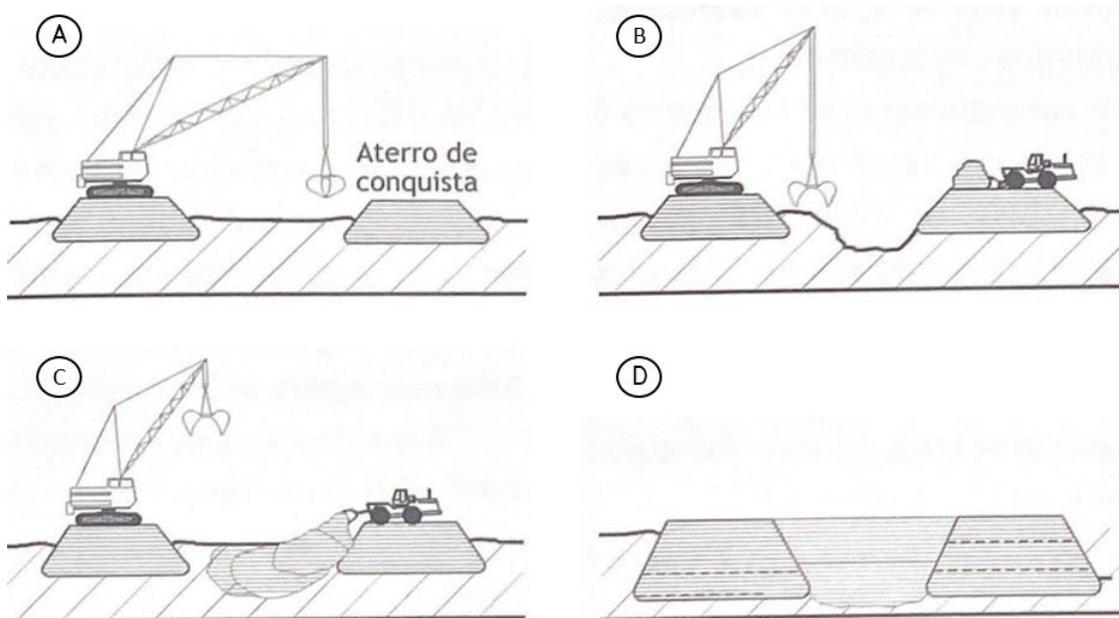
Entretanto, Massad (2003) afirma que a remoção de solos pode ser realizada com espessura de no máximo 7 m, por meio de não somente escavação mecânica, mas também por meio de explosivos para liquefazerem os solos moles, que acabam sendo expulsos pelo material de aterro que vai ocupando seu lugar.

Somado a isso, é necessário salientar que a remoção do solo mole deve seguir o projeto geotécnico prévio e satisfazer as condições mínimas conforme especificações da NORMA DNIT 381/2021 – PRO. De acordo com essa norma é necessário que se atinja uma camada de solo que apresente resistência ao cisalhamento prevista em projeto e que, caso ocorra algum problema, devem ser executadas camadas adicionais até garantir uma fundação adequada. Esse processo de remoção do solo mole tem como vantagem a diminuição ou eliminação dos recalques e aumento do fator de segurança quanto à ruptura.

De acordo com Almeida e Marques (2014), inicialmente é executado um aterro para a conquista do terreno, apenas para permitir o acesso de máquinas e equipamentos, permitindo que seja feita a escavação, por meio de uma draga, daquele solo e em seguida preenchendo a cava com material de aterro, nesse caso brita 3.

É importante salientar que o material deve ser lançado e espalhado, a uma altura maior que 1 metro da lâmina d'água, com o uso de carregadeira sobre esteiras. Além disso, após o basculamento da brita no local do solo mole, o material deverá ser espalhado em camadas e acomodado com as costas da concha da escavadeira de forma a comprimir ao máximo o material. Assim que o trator de esteira assumir a execução o processo, é necessário que o mesmo espalhe o material em camadas de forma que o peso próprio do trator faça a acomodação da camada, resultando em uma superfície final suavizada, com pouca inclinação, adequadamente comprimida e compatível com o terreno natural.

Figura 6 - Sequência executiva de substituição de solo mole: (A) escavação e retirada de solo mole; (B) e (C) preenchimento da cava; (D) solo substituído, situação final



Fonte: ALMEIDA, M. MARQUES, M., 2014

Por conta de apresentar uma baixa capacidade de suporte dessas camadas superficiais, essas etapas devem ser realizadas com muito cuidado e equipamentos mais leves. No caso de solos muito moles, observa-se que o aterro das pistas de acesso experimenta recalques contínuos em decorrência da sobrecarga de tráfego de equipamentos e de lançamentos de aterro para corrigir desníveis durante essa fase. Na sequência, a cava é toda preenchida de material de aterro, sendo necessária a verificação das espessuras de argilas remanescentes por meio de sondagens (ALMEIDA; MARQUES, 2014).

Os solos moles escavados devem ser transportados para os locais indicados e aprovados (bota-fora). O controle da escavação, da remoção e da compressão do bota fora é feito através da verificação visual.

2.6.2.2 Aterro com argila

O material convencionalmente utilizado na execução do aterro são solos argilosos proveniente de empréstimo devidamente caracterizada e selecionada, atendendo aos requisitos normalizados, em termos de características mecânicas e físicas.

O lançamento do material é realizado em camadas sucessivas em toda a largura da seção transversal, e em quantidades que possam atender a extensão, nas etapas de umedecimento e compactação. Para o aterro as espessuras de cada camada compactada não devem ultrapassar 30 cm, já para as camadas finais essa espessura não deve ultrapassar de 0,20 m. A umidade deverá ser obtida em mais ou menos 3% da umidade ótima de laboratório. O teor de água possui grande efeito na resistência à compactação da argila (ARTERIS, 2019).

Na execução do aterro deve ser verificada a inclinação dos taludes com o uso de gabaritos, bem como pelas referências laterais. A fim de proteger os taludes contra os efeitos da erosão deve ser realizada a drenagem e obras de contenção, mediante a plantação de gramíneas (ARTERIS, 2019).

Além disso, deve-se proceder ensaio de massa específica aparente "in situ", em locais escolhidos aleatoriamente, por camada distribuídos, regularmente, ao longo do segmento pelos Métodos de Ensaio das Normas DNER ME 092/94 e DNER ME 037/94. As determinações do grau de compactação (GC) devem ser realizadas utilizando-se os valores da massa específica aparente seca de laboratório e da massa específica aparente "in situ" obtida no campo. Todas as camadas do aterro devem ser convenientemente compactadas, em conformidade com o definido em projeto proposto.

O controle geométrico de execução é feito por levantamento topográfico, considerando os elementos geométricos estabelecidos nas notas de serviço, com as quais é feito o acompanhamento da execução da obra.

2.6.2.3 Aterro com agregado siderúrgico

O processo de execução do aterro com agregado siderúrgico segue todas as mesmas etapas (incluindo os mesmos maquinários) de um aterro com agregados convencionais, diferindo-se apenas nas quantidades de materiais utilizados, visto que nesse caso não se utiliza a brita e utiliza-se menor quantidade de argila. O agregado siderúrgico utilizado é comercialmente conhecido como Ecolastro cuja granulometria é entre 32 a 75 mm.

Do ponto de vista executivo, cada camada não se pode exceder a altura de 30 cm e o lançamento do material deve ser feito em camadas consecutivas em

toda largura da seção transversal. O material espalhado deve ser acomodado com a utilização do rolo compactador. ((ARTERIS, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo desta ACV conforme já mencionado no capítulo 2 é comparar os impactos ambientais da utilização do agregado siderúrgico (escória LD) em substituição ao uso dos agregados naturais (brita e argila) em aterros sobre solo mole, para assim concluir qual dos dois agregados causa o menor impacto ambiental. Para definição do escopo do projeto, definiu-se o sistema do produto assim como sua fronteira e unidade funcional, o software utilizado para ACV, a base de dados e o processo de referência utilizados e o método de AICV e suas categorias de impacto.

A abordagem escolhida foi a atribucional, que é caracterizada pelo uso de dados médios de ICV e de alocação de coprodutos, possuindo como objetivo a avaliação dos impactos ambientais de um produto do berço ao túmulo, ou do berço ao uso, em um sistema estático. Além disso, é válido salientar que o método de distribuição de impactos utilizado não é dado como multifuncional, ou seja, esses processos não produzirão mais de um produto, serviço ou função.

3.1.1 Visita a empresa executora de aterros

Para a definição do escopo do projeto foi realizada a visita a empresa KAEME que é uma empresa especializada em serviços de apoio e elaboração de projetos finais de engenharia rodoviária, dentro de padrões técnicos estabelecidos pelas normas rodoviárias vigentes. Durante a visita, os especialistas da empresa apresentaram o procedimento detalhado de duas obras de aterro: uma com material convencional (brita e argila) e outra utilizando coproduto (escória LD e argila). Assim, foi possível o entendimento das etapas construtivas de um aterro sobre solo mole bem como todos os dados relativos à distância dos materiais, máquinas e equipamentos utilizados demais dados necessários para um estudo de ACV. Os apêndices 1, 2 e 3 apresentam as quantificações para o aterro com material convencional, aterro com agregado siderúrgico e execução do bota fora, respectivamente.

3.1.2 Sistema do produto

O sistema de produto definido foi a construção de um aterro sobre solo mole e a unidade funcional é uma unidade de aterro. Para realização dos cálculos no software, foi considerado um aterro de 100 m de comprimento e 3550 m² de área com largura de base de 35,50 m, largura de topo de 20,50m, altura do corpo de aterro com

5,00 m e escavação para remoção de solo mole com 3 metros de altura, totalizando um aterro com 8 m de altura, sendo 3 m abaixo da cota natural do terreno e 5 m acima da cota do terreno natural. O nível d'água está 1 m abaixo do terreno natural.

Esse exemplo de aterro é utilizado para viabilizar a construção de uma pista padrão do DER-ES, tendo 2 faixas de rolamento com 3,5 m cada, 2 acostamentos com 2,5 m cada e duas áreas laterais, sendo 0,65 m para drenagem e 2,5 m para encaixe da sinalização vertical. A função desse aterro é a de receber as cargas da pista construída sobre ele, de forma a evitar possíveis recalques na construção.

Em relação às distâncias entre possível localidade da obra e o fornecimento dos materiais necessários, foi considerado que a obra em questão se encontra sempre a uma distância de 20 km da jazida de argila, 40 km para a pedreira e 50 km para fonte do agregado siderúrgico. Essa escolha de distância foi baseada na experiência de obras de aterro mencionadas pela empresa KAEME e considerando o cenário mais próximo da realidade do local a que a indústria está situada, nesse caso, no estado do Espírito Santo. Assim, pelo fato do Espírito Santo se destacar na extração e no beneficiamento de rochas ornamentais, sendo responsável por aproximadamente 80% da produção nacional (SGB-CPRM, 2021), a distância da obra até a pedreira foi considerada menor do que a da obra até a indústria.

Já a fronteira adotada para o sistema está explicitada nas Figuras 7 e 8 (apresentadas nos tópicos 4.1.2.1 e 4.1.2.2) foi a berço ao uso. Essa técnica considera os impactos em cada estágio do ciclo de vida de um produto, desde o momento em que os recursos naturais são extraídos da natureza e processados até cada estágio subsequente de fabricação, transporte e uso do produto.

3.1.2.1 Aterro convencional

A execução do aterro consiste inicialmente na remoção do solo mole por meio da escavação, carregamento do material escavado e transporte para o bota fora. Quando o solo mole chega no local destinado para o bota fora é realizado o espalhamento e conformação do material e utilização de carros pipas para molhagem. Por fim, é realizado o plantio de gramíneas a fim de evitar a erosão.

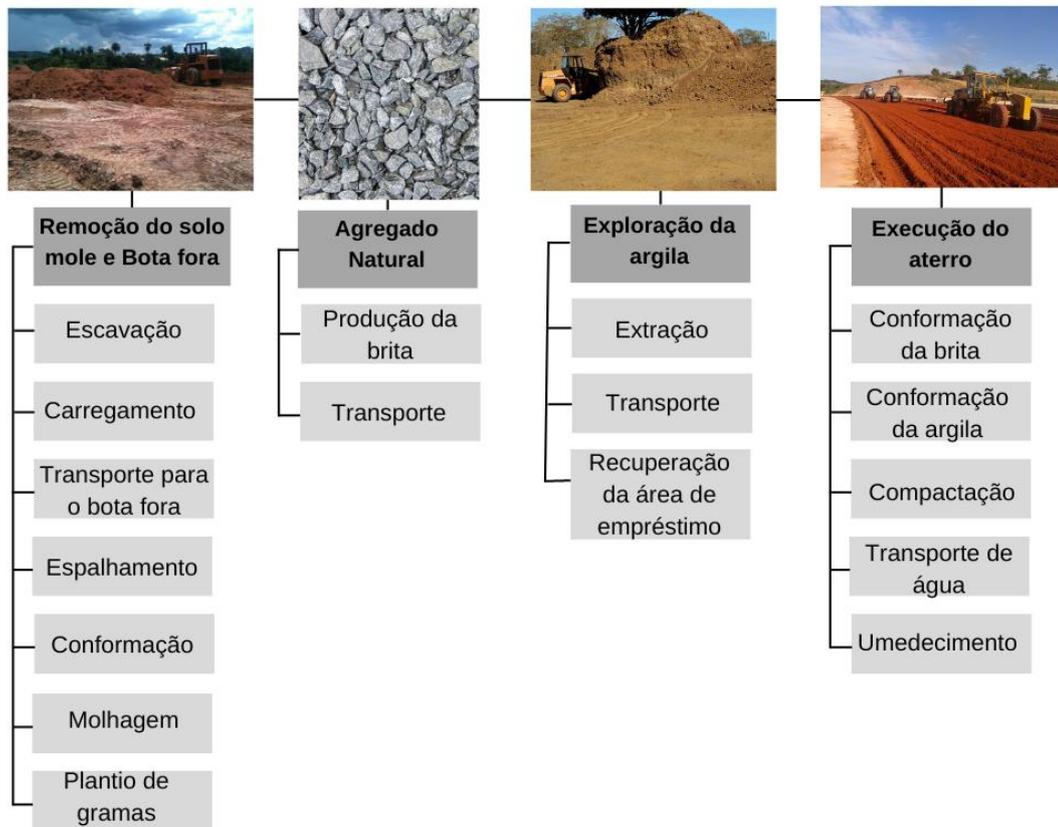
A obtenção do agregado natural envolve uma série de etapas. A primeira delas é a decapagem, na qual é preciso deixar uma face limpa e aberta para remoção da

camada de terra depositada sobre a rocha visando possibilitar a perfuração da rocha convenientemente distribuída de forma que os furos originados, quando detonados possam produzir fragmentos de tamanhos adequados. Os fragmentos de rochas de grandes dimensões são carregados para um caminhão e em seguida transportados para a pedreira. Na indústria, a primeira etapa é a britagem primária, passando pelo transportador de correia até a britagem secundária para, por fim, passar pelo processo de peneiramento mecânico e lavagem (SCHANKOSKI, 2020). O agregado é estocado dentro dos pátios e levado às obras por meio da malha rodoviária.

A exploração da argila por sua vez é iniciada com a remoção da camada vegetal de forma que possibilite a extração do material por meio de cortes no terreno. Em seguida, sem passar por nenhum beneficiamento, o material é transportado até a obra por caminhões. No local de extração do mineral, é realizada a regularização do talude.

A próxima etapa consiste na conformação da brita no local escavado e a última etapa consiste na deposição da argila, compactação das camadas, umedecimento para evitar a formação de poeira. Um exemplo esquemático é apresentado na Figura 7 e a planta de uma seção típica de aterro sobre solo mole utilizando agregado natural e argila é apresentada no Apêndice A.

Figura 7 - Execução do aterro com agregado natural



Fonte: Autoras, 2023.

3.1.2.1.1.1 Conformação de bota fora

Este serviço consiste na deposição ordenada, em local previamente definido e aprovado de matérias provenientes de escavação de solo mole, materiais de 1ª, 2ª e 3ª categorias considerados inadequados, ou matérias em excesso que não foram integrados aos aterros. A deposição de materiais, quando necessário, deve ser complementada por pequenas obras para estabilização, drenagem de águas contra erosões e outras obras que vierem a ser necessárias.

Os locais mais adequados para se constituírem em áreas de depósitos são: crateras de exploração industrial desativada, áreas abertas improdutivas, voçorocas em fase de formação e aterros sanitários. Não é permitido o uso de áreas em locais como reservas florestais, ecológicas, preservação cultural, áreas de mananciais e nascentes d'água, faixas de domínio de estrada de ferro sob pontes e viadutos.

O material destinado ao depósito de material excedente (bota fora) deve ser descarregado e espalhado de modo que a conformação da superfície acabada seja

coerente com a topografia local. Nesse sentido, é vedada a disposição de materiais pelo simples descarregamento em forma de monte. Na deposição dos materiais o serviço deve proceder de tal forma que durante e após o término das operações não haja possibilidade de assoreamento de cursos d'água ou lagos próximos, pelo carreamento de material por enxurradas. Além disso, os taludes devem ter inclinação suficiente para evitar escorregamentos.

O controle das áreas de bota fora é feito visualmente sendo observado o aspecto de segurança, acabamento e garantia contra erosões. A área a ser utilizada deve estar devidamente licenciada, sendo realizada a recuperação vegetal da área após a conformação final do depósito de acordo com projeto ambiental licenciado pelo órgão ambiental, a fim de incorporá-lo à paisagem local. Uma seção típica de área para conformação de bota fora é apresentada no Apêndice B.

3.1.2.1.2 Conformação da área de empréstimo

O procedimento para recuperação das áreas degradadas para a obtenção de materiais na construção rodoviária envolve um conjunto de medidas destinadas à reabilitação ambiental delas.

Dadas as alterações processadas na utilização dessas áreas, particularmente os processos naturais do meio físico, as áreas de apoio às obras estão sujeitas a autorizações, aprovações e licenciamentos específicos, por parte de órgãos federais, estaduais e municipais, aos quais cabem, nas respectivas áreas de atuação, a fiscalização, a constatação da prática de irregularidades e a imposição de penalidades previstas na legislação pertinente.

A definição da forma de recuperação das áreas exploradas deve seguir os manuais de recuperação vegetal do DNIT (2009) e levar em conta a recomposição topográfica e paisagísticas e deverá contemplar as seguintes operações:

- a) O estabelecimento de medidas de isolamento da área em relação ao trânsito de animais domésticos e pessoas;
- b) A conformação de seções estáveis para áreas degradadas, com raspagem e retirada de entulhos;
- c) Eventual execução de rede de drenagem;

- d) A cobertura uniforme do local com a camada fértil do solo, removida e estocada adequadamente durante a fase de implantação;
- e) A aplicação de calcário e adubos orgânicos, buscando a correção físico-química do solo;
- f) O repovoamento com espécies vegetais, propiciando a aceleração do processo de regeneração natural;

As medidas a serem implementadas devem ser particularizadas para cada caso guardando consonância com a situação de cada área degradada, sem defasagem prolongada já que poderia provocar intensificação do processo erosivo.

As jazidas quando originarem grandes depressões no terreno, deverão ser utilizadas como locais de bota fora de materiais excedentes, não contaminadas, retrabalhados de forma a permitir a uniformização, antes da aplicação da camada de solo fértil.

Os taludes e rampas deverão ter sua declividade suavizada, a fim de evitar a intensificação dos processos erosivos, facilitando a recuperação destas áreas. A recuperação de taludes de corte, em seu estágio final, deverá ser realizada, preferencialmente, com a aplicação de hidrossemeadura de espécies com raízes superficiais, como gramíneas.

Todas as áreas devem apresentar, ao encerramento das atividades, uma configuração geométrica compatível com a topografia dos terrenos adjacentes, mediante aferição e atenuação de taludes. A reordenação das linhas de drenagem e a recomposição da cobertura vegetal de modo a permitir o tratamento harmônico da mesma com a paisagem circundante.

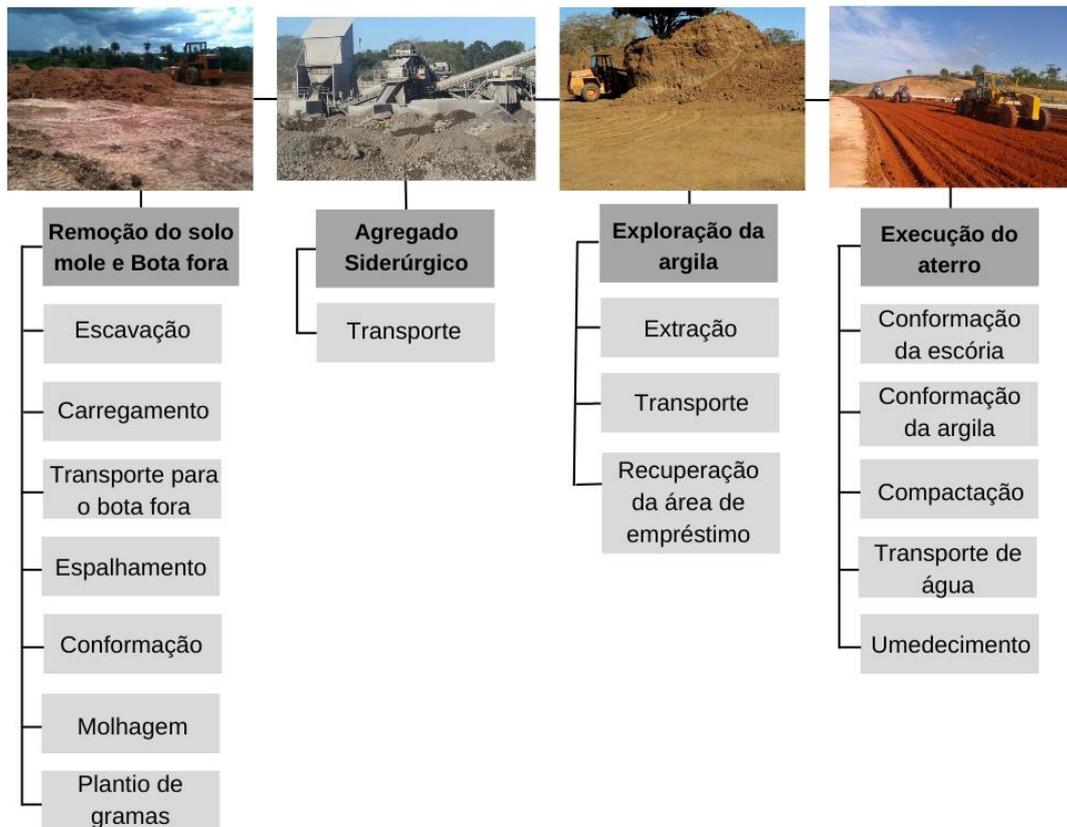
3.1.2.2 Aterro com agregado siderúrgico

O processo de obtenção do agregado já foi descrito no item 2.6.1.3. Entretanto os gastos energéticos e emissões da etapa de geração do agregado siderúrgico não serão considerados, uma vez que eles impactam no ciclo de vida do aço, sendo o agregado siderúrgico um coproduto gerado durante o processo. O agregado estocado nas usinas siderúrgicas é levado até as obras também por meio da malha rodoviária. Assim, a escória entra com carga zero, pelo fato de ser um produto de revalorização.

Na utilização do agregado siderúrgico para o aterro proposto, o material será utilizado no preenchimento da escavação para o solo mole com altura de 3 metros e parte do corpo do aterro, também com altura de 3 metros em substituição à argila, restando 2 metros para ser construído com argila. Essa configuração já foi adotada em aterros já executados pela empresa KAEME.

O processo executivo é o mesmo do solo mole, inclusive com a utilização dos mesmos maquinários. Na etapa do processo construtivo onde o agregado siderúrgico entra como substituto da argila, deverá ser executada a descarga do material, espalhamento em camadas, não excedendo a altura de 30 cm. O lançamento do material para construção do aterro deve ser feito em camadas consecutivas em toda a largura da seção transversal. O material espalhado deverá ser acomodado com a utilização do rolo compactador. Como o material possui granulometria de 32 a 75 milímetros não é possível executar a compactação conforme descrito na norma para aterros do DNIT 2009, assim como não é realizada a verificação do grau de compactação do mesmo. A Figura 8 exibe o fluxograma do processo e a planta de uma seção típica de aterro sobre solo mole utilizando agregado siderúrgico e argila é apresentada no Apêndice C. As demais etapas são idênticas às especificadas no item anterior.

Figura 8 - Execução do aterro com agregado siderúrgico



Fonte: Autoras, 2023.

3.1.3 Software utilizado

Para a realização dos cálculos da avaliação do ciclo de vida foi utilizado o software livre openLCA versão 1.11.0 de 2021, desenvolvido pela empresa GreenDelta e disponível gratuitamente. O software oferece a maior coleção de conjuntos de dados e banco de dados em todo o mundo para software LCA, alguns para compra, alguns com custo para aquisição e outros totalizando quase 100.000 conjuntos de dados diferentes estão disponíveis (OpenLCA, 2022).

3.1.4 Banco de dados

Para a presente pesquisa, foi utilizada a base de dados Ecoinvent 3.6 cutoff unit. O ecoinvent é uma biblioteca de inventários com dados de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia) relacionadas ao ciclo de vida de muitos produtos, processos, sistemas de transporte, de energia, disposição de resíduos, entre outros (ACV Brasil, 2022).

A Ecoinvent Association é uma organização sem fins lucrativos dedicada a promover e apoiar a disponibilidade de dados ambientais em todo o mundo, oferecendo suporte a avaliações ambientais de processos e produtos em todo o mundo (Ecoinvent, 2022).

3.1.5 Métodos de AICV

Foram selecionados dois métodos de AICV: Recipe 2016 Midpoint (H) e EN 15804 + A2 Method. O primeiro por ser a base de dados que contempla a maior quantidade de categorias de impacto, sendo mundialmente utilizado (HUIJBREGTS et al., 2016). Já o segundo, de acordo com a Enciclo (2022) é o método de AICV mais utilizado na construção civil, trazendo apenas categorias de impacto relevantes para esse setor.

3.1.5.1 Recipe 2016 Midpoint

Segundo Saade et al. (2014), para esse método de AICV existem 3 versões: hierárquica (H), igualitária (E) na qual a análise é realizada muito a longo prazo e individualista (I) que analisa a curto prazo (GOEDKOOOP et al., 2000).

No presente trabalho foi selecionada a versão hierárquica por trazer um equilíbrio entre curto e longo prazo bem como avaliação dos efeitos incluídos na com base em consenso.

3.1.5.2 EN 15804 + A2 Method

O método de AICV EN 15804 + A2 Method possui uma abordagem simplificada na qual processos unitários que representem menor de 1% da massa e da energia total (em módulo) causam a omissão de fluxos de entrada e de saída em processos unitários (PULGROSSI; SILVA, 2020).

3.1.6 Seleção das categorias de impacto

De acordo com a NBR ABNT ISO/TR 14047 (2016), foram selecionadas as categorias de impacto de acordo com o objeto de estudo do presente trabalho:

- Aquecimento global: de acordo com junges et. al (2018), esse é um fenômeno global e de longo prazo causado pelas emissões de gases (CO₂ e GEE) que intensificam o efeito estufa causando mudanças climáticas que são caracterizadas como mudanças graduais na temperatura, precipitação,

umidade atmosférica e intensidade do vento, bem como o aumento do nível do mar e mudanças na ocorrência de eventos extremos (SESANA, 2021);

- Depleção de ozônio estratosférico: de acordo com Wei et. al (2022), o ozônio atmosférico passou por mudanças distintas na estratosfera e na troposfera durante a segunda metade do século XX, com diminuição da estratosfera e aumento da troposfera;
- Acidificação: a acidificação, em conjunto com outros estresses ambientais relacionados à mudança climática, particularmente sob futuras mudanças climáticas e níveis atmosféricos de CO₂ ainda mais elevados, potencialmente coloca em risco muitos dos valiosos serviços ecossistêmicos que o oceano fornece à sociedade, como pesca, aquicultura e proteção costeira (DONEY, 2020).
- Ecotoxicidade: quantifica os efeitos de substâncias químicas em seres vivos e comunidades naturais (GODINHO, 2021).
- Material particulado: de acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), o material particulado pode tornar os lagos e riachos ácidos bem como contribui para os efeitos da chuva ácida.
- Uso da terra: de acordo com Li et. al (2007), as formas de uso e ocupação da terra influenciam os processos bio físico-químicos do solo através de mudanças nas práticas e manejo.
- Uso da água: Pfister et al. (2009) e De Schryver et al. (2011) afirmam que o uso da água é o cálculo dos fatores de caracterização de ponto médio e os fatores de caracterização de ponto final para impactos na saúde humana e na vegetação terrestre (qualidade do ecossistema).
- Uso de recursos minerais: segundo Gomes et. al (2000), um dos principais impactos ambientais do uso de recursos naturais é a destruição de habitats, sendo o maior responsável pela diminuição do número de espécies em todo o planeta.
- Eutrofização: o processo de eutrofização é caracterizado como a adição de nutrientes à água de lagos e rios, o que estimula o crescimento de plantas que podem retirar oxigênio da água causando morte da fauna marinha (FERREIRA et al. 2015).

- Toxicidade humana carcinogênica: A toxicidade humana carcinogênica é uma categoria de impacto resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela poluição, que acabam ocasionando danos carcinogênicos à saúde humana (RANGEL; LIMA; ALVARADO, 2018).
- Toxicidade humana não-carcinogênica: A toxicidade humana não carcinogênica é uma categoria de impacto resultante do aumento da concentração de agentes tóxicos provocado pela poluição, ocasionando, conseqüentemente, potenciais danos à saúde humana, ainda que não carcinogênicos (RANGEL; LIMA; ALVARADO, 2018).

3.2 Análise de inventário

Foram modelados 2 processos no software OpenLCA: o primeiro chamado de Aterro com Brita contempla as seguintes etapas:

- Remoção do solo mole;
- Execução do bota-fora;
- Transporte do materiais;
- Exploração da argila;
- Produção da brita;
- Execução do aterro.

Os fluxos contendo as entradas e saídas do processo (inputs e outputs) do aterro com brita estão listados nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8.

Tabela 4 - Inputs e outputs da remoção de solo mole do aterro com brita

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Escavação do solo mole de onde será executado o aterro	excavation, hydraulic digger excavation, hydraulic digger Cutoff, U	Remoção da camada de solo mole	10645	m ³
Carregamento do caminhão com o solo mole	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor machine operation,	Utilização da carregadeira para carregar o caminhão com o solo mole	323	h

	diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor Cutoff, U			
Transporte do solo mole até o bota-fora	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U	Representa o serviço de transporte de carga de 1 tkm em um caminhão da classe de tamanho 16-32 toneladas métricas de peso bruto do veículo (GVW) e classe de emissões Euro III.	$11709,5 \cdot 10 = 117095$	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é o volume sendo dado em m³.

Tabela 5 - Inputs e outputs da execução do bota-fora do aterro com brita

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Remoção do solo mole	Remoção do solo mole	Consideração dos impactos da etapa apresentada na Tabela 2 nesse processo	10645	m ³
Uso e ocupação do solo	Occupation, dump site	Nesse caso, não é um processo e sim uma base de dados da natureza que considera os impactos de uso e ocupação da área do bota-fora	3000	m ² *a em que a representa anos
Espalhamento e ajuste do solo no bota fora	Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, generators machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, generators Cutoff, U	Uso do trator de esteira para espalhamento e ajuste do solo no bota fora	59	h

Conformação do solo mole	Machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor Cutoff, U	Uso do rolo compactador para conformação do solo	59	h
Plantação de gramíneas no bota fora a fim de evitar a erosão	Sowing sowing Cutoff, U	Utilização da semeadora típica, largura de trabalho de 3m. A atividade termina com a semeadura, retorno ao galpão e desacoplamento do implemento do trator	3000	m ²
Água utilizada para molhar as sementes	Water, river, BR	Matérias prima	6000	l
Remoção da água do rio	water pump operation, diesel water pump operation, diesel Cutoff, U	Este conjunto de dados representa a operação de uma bomba de água movida por um motor a diesel	1617,73	MJ
Transporte da água e sua utilização no bota-fora	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 Cutoff, U	Esse conjunto de dados representa o transporte no caminhão-pipa e sua utilização no bota-fora	$6 \cdot 5,3 = 31,8$	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é área sendo dada em m².

Tabela 6 - Inputs e outputs da produção da brita

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Produção da brita	Gravel production, crushed gravel, crushed Cutoff, U	Este conjunto de dados descreve a produção de pedra britada, geralmente aplicada em materiais de construção, a partir de pedreiras abertas de granito ou basalto, que representa o processo típico de extração de pedra no Brasil. São considerados todas as etapas de produção da brita até a saída do caminhão da pedreira	14370,75	t
Transporte da brita até o local de construção do aterro	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U	Considera o impacto do transporte da pedreira até a obra	14370,75*40	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é o volume sendo dado em m³.

Tabela 7 - Inputs e outputs da extração da argila para o aterro com brita

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Produção da argila	clay pit operation clay Cutoff, U	Este conjunto de dados representa a produção de 1 kg de argila em uma mina, assumindo uma espessura da camada de argila na natureza de 30m. O conjunto de dados termina com o transporte	22315,8	t

		para a primeira retificadora. O conjunto de dados inclui o uso e transformação da terra e o recultivo da área.		
Transporte da argila até o local de construção do aterro	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U	Considera o impacto do transporte da jazida de argila até a obra	22315,8*20= 446316	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é o volume sendo dado em m³.

As Tabelas 4-7 tem como objetivo descrever os principais processos de preparação dos materiais bem como do aterro. Assim, o único processo que será calculado será o apresentado na Tabela 8 visto que ele contempla todos os processos anteriormente descritos.

Tabela 8 - Inputs e outputs da execução do aterro com brita

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Execução do bota fora	Execução do bota fora - BR - ES	Processo descrito na Tabela 3	3000	m ²
Matéria-prima: brita	Produção da brita - BR - ES	Processo descrito na Tabela 4	10645	m ³
Matéria-prima: Argila	Exploração da jazida de argila - BR - ES	Processo descrito na Tabela 5	14305	m ³
Conformação das britas no local escavado	Excavation, hydraulic digger excavation, hydraulic digger Cutoff, U	Preenchimento do aterro onde foi removido o solo mole com britas utilizando escavadeira hidráulica	10645	m ³

Matéria-prima: água	Water, river, BR	Água utilizada para homogeneização da argila antes da aplicação no corpo do aterro	10000	l
Remoção da água do rio	water pump operation, diesel water pump operation, diesel Cutoff, U	Este conjunto de dados representa a operação de uma bomba de água movida por um motor a diesel	9917,21	MJ
Transporte da água e sua utilização no bota-fora	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 Cutoff, U	Esse conjunto de dados representa o transporte no caminhão-pipa e sua utilização no bota-fora	$10*(6,8+5)$ =118	t*km
Umedecimento do aterro	Machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor Cutoff, U	Esse conjunto de dados representa um trator agrícola fazendo a umectação da argila	102	h
Conformação da argila sobre a brita	excavation, hydraulic digger excavation, hydraulic digger Cutoff, U	Conformação da argila sobre brita utilizando escavadeira hidráulica	14305	m ³
Compactação	Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, steady-state machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, steady-state Cutoff, U	Utilização do rolo compactador para compactação da argila e finalização do aterro	102	h

A unidade do processo em questão é número de itens sendo dado como 1 aterro de 100 metros de comprimento e 3550 m² de área.

Em ambos os casos é utilizada uma manta geotêxtil popularmente chamada de Bidim® (Figura 12) de forma a evitar que os grãos de argila ultrapassem a camada de agregado (natural ou siderúrgico). Esse item não foi encontrado na base de dados ecoinvent 3.6 e por não haver nenhum item semelhante e sabendo que é utilizada a mesma manta para ambos os aterros, os impactos advindos da produção e transporte desse material foram desconsiderados.

Figura 9 - Manta geotêxtil



Fonte: Total solo, 2022.

A Manta Geotêxtil é utilizada para separação entre a argila e a camada de agregados que constituem o corpo do aterro. Assim, ela evitará interpenetração da base granular no solo, garantindo que a resistência da base seja preservada (Total solo, 2022).

O segundo processo modelado no software OpenLCA, chamado de Aterro com agregado siderúrgico, contempla as seguintes etapas:

- Remoção do solo mole;
- Execução do bota-fora;
- Obtenção do agregado siderúrgico;
- Transporte dos materiais;
- Exploração da argila;

- Execução do aterro.

Os processos 1 e 2 são exatamente iguais para os dois tipos de aterro, tanto em maquinários utilizados como a respeito de horas trabalhadas e distâncias percorridas. Por outro lado, a Etapa 3, apesar de usar dos mesmos maquinários difere nos dois aterros devido a quantidade de materiais a serem utilizados. No caso do aterro com brita, há maior utilização de argila e, portanto, os maquinários precisaram trabalhar por mais horas.

Essa diferença de horas trabalhadas dos maquinários também acontece na Etapa 5 que é a execução do aterro propriamente dita. Isso porque existe uma diferença entre os materiais utilizados e conseqüentemente difere a forma de execução.

Os fluxos contendo as entradas e saídas do processo (inputs e outputs) estão listados nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9 - Inputs e outputs da obtenção da escória

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Transporte do agregado siderúrgico até o local de construção do aterro	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U	Considera o impacto do transporte da indústria siderúrgica até a obra	33896,3*50	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é o volume sendo dado em m³.

Não foram considerados os impactos da produção do agregado siderúrgico visto que o objetivo do processo é a produção do aço, e seus impactos estão contemplados na produção do aço.

Tabela 10 - Inputs e outputs da extração da argila para o aterro com agregado siderúrgico

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Produção da argila	clay pit operation	Este conjunto de dados representa a produção de	7817,16	t

	clay Cutoff, U	1 kg de argila em uma mina, assumindo uma espessura da camada de argila na natureza de 30m. O conjunto de dados termina com o transporte para a primeira retificadora. O conjunto de dados inclui o uso e transformação da terra e o recultivo da área.		
Transporte da argila até o local de construção do aterro	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U	Considera o impacto do transporte da jazida de argila até a obra	7817,16*20 = 156343,2	t*km

Fonte: Autoras, 2023.

A unidade do processo em questão é o volume sendo dado em m³.

Tabela 11 - Inputs e outputs da execução do aterro com escória

Processo realizado	Fluxo	Descrição	Quantidade	Unidade
Execução do bota fora	Execução do bota fora - BR - ES	Processo descrito na Tabela 3	3000	m ²
Material: agregado siderúrgico	Obtenção da escória - BR - ES	Processo descrito na Tabela 7	19939	m ³
Material: Argila	Exploração da jazida de argila - BR - ES	Processo descrito na Tabela 8	7817,16	m ³
Conformação do agregado siderúrgico no local escavado	Excavation, hydraulic digger excavation, hydraulic digger Cutoff, U	Preenchimento do aterro onde foi removido o solo mole com agregado siderúrgico utilizando escavadeira hidráulica	19939	m ³

Compactação	Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, steady-state machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, steady-state Cutoff, U	Utilização do rolo compactador para compactação do agregado siderúrgico	142	h
Matéria-prima: água	Water, river, BR	Água utilizada para homogeneização da argila antes da aplicação no corpo do aterro	6000	l
Remoção da água do rio	water pump operation, diesel water pump operation, diesel Cutoff, U	Este conjunto de dados representa a operação de uma bomba de água movida por um motor a diesel	5950,3	MJ
Transporte da água e sua utilização no bota-fora	transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO2 Cutoff, U	Esse conjunto de dados representa o transporte no caminhão-pipa e sua utilização no bota-fora	$10*(6,8+5) = 118$	t*km
Umedecimento do aterro	Machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor Cutoff, U	Esse conjunto de dados representa um trator agrícola fazendo a umectação da argila	36	h
Conformação da argila sobre o agregado siderúrgico	excavation, hydraulic digger excavation, hydraulic digger Cutoff, U	Conformação da argila sobre da escória utilizando escavadeira hidráulica	5011	m ³

Compactação	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state Cutoff, U	Utilização do rolo compactador para compactação da argila e finalização do aterro	36	h
-------------	---	---	----	---

Fonte: Autoras, 2023.

3.3 Normalização e ponderação

De acordo com a NBR ISO 14044 (2014), a normalização é o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a alguma informação de referência, sendo que o objetivo da normalização é entender melhor a magnitude relativa para cada resultado de indicador do sistema de produto em estudo. Valores de referência usados podem ser entradas e saídas totais para uma dada área que pode ser global, regional, nacional ou local, per capita ou outra medida similar e em um cenário de linha-base, tal como um dado sistema alternativo de produto.

A normalização é um elemento opcional na AICV, entretanto, apresenta grande utilidade, uma vez que pode auxiliar a verificar inconsistências, fornece e comunicar informações sobre a significância relativa dos resultados dos indicadores, e preparar procedimentos adicionais, tais como agrupamento, ponderação ou interpretação do ciclo de vida (NBR ISO 14044, 2022).

Para o trabalho em questão, foi aplicada a normalização World 2010 (H), cujo método utilizado é hierárquico e por isso avalia a perspectiva de tempo fazendo um equilíbrio entre curto e longo prazo.

3.4 Ensaios laboratoriais

Foi solicitado ao laboratório Tommasi a classificação ambiental completa e no presente trabalho foi evidenciado o ensaio de Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado) da ABNT NBR 10.004 (2004). O ensaio foi realizado segundo a norma e em todos os materiais: argila, brita e escória. Os dados deste ensaio foram adicionados ao OpenLCA como fluxos naturais de dados de saída (outputs).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da avaliação de impacto para cada uma das categorias de impacto definidas no item 3.1.5 são apresentados no tópico seguinte. Convém destacar que ao total foram analisados mais de 13 mil processos para cada sistema de produto.

4.1 Caracterização dos materiais

Os resultados de caracterização descritos no item 3.4 são apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Além disso, os Anexos A, B e C exibem os laudos do laboratório responsável pelo ensaio.

Tabela 12 - Resíduos sólidos Argila

Parâmetro	Resultado (mg/L)
Alumínio	< 0,01
Cloreto total	4
Nitrato	0,69
Bário	0,073
Cobre	< 0,01
Zinco	0,039
Ferro	0,045
Manganês	0,07
Sódio	1,1
Sulfato	< 0,01

Fonte: Tommasi, 2022.

Tabela 13 - Resíduos sólidos brita

Parâmetro	Resultado (mg/L)
Alumínio	0,177
Cloreto total	2
Nitrato	0,37
Bário	0,026
Cobre	0,0011

Zinco	0,015
Ferro	0,041
Manganês	< 0,01
Sódio	4,46
Sulfato	5

Fonte: Tommasi, 2022.

Tabela 14 - Resíduos sólidos agregado siderúrgico

Parâmetro	Resultado (mg/L)
Alumínio	0,197
Cloreto total	40
Nitrato	0,5
Bário	0,752
Cobre	< 0,01
Zinco	< 0,01
Ferro	< 0,01
Manganês	< 0,01
Sódio	15,2
Sulfato	< 0,01

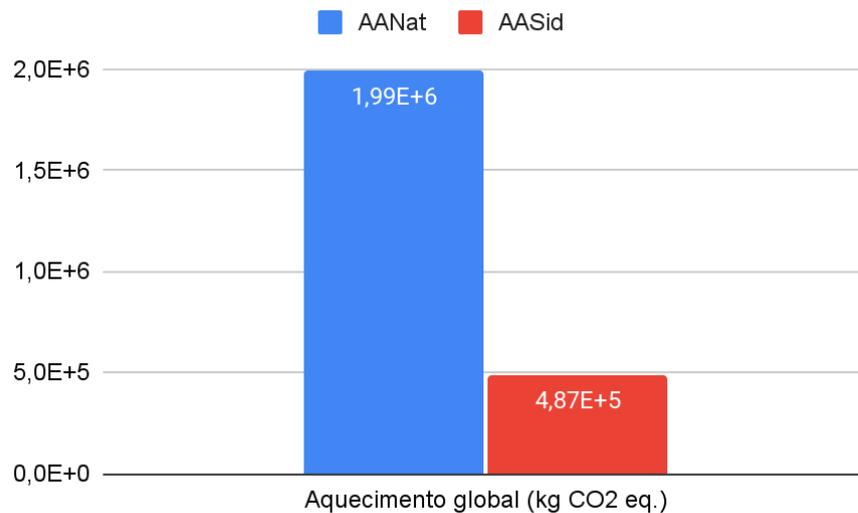
Fonte: Tommasi, 2022.

4.2 Avaliação de impacto e interpretação

Os resultados para as categorias de impacto apresentados no item 3.1.6 foram analisados seguindo o método de AICV ReCiPe 2016 Midpoint (H) e os resultados serão discutidos nos tópicos subsequentes.

4.2.1 Aquecimento global

O Gráfico 2 apresenta a quantificação do impacto de cada um dos aterros em relação ao aquecimento global, dado em kg CO₂ equivalente. Nesse gráfico, é possível perceber que o aterro com agregado siderúrgico emite cerca de 76% menos de kg CO₂ equivalente do que o aterro com agregados naturais.

Gráfico 2 - Aquecimento global

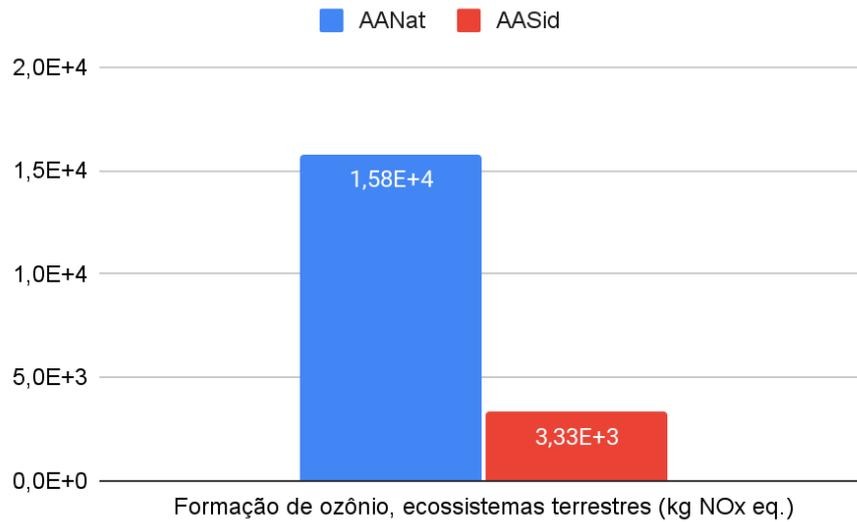
Fonte: Autoras, 2023.

Os resultados da análise são maiores para o aterro com agregados naturais principalmente devido a maior quantidade de diesel queimado nas máquinas de construção (representando quase 30% da emissão de CO₂ equivalente) como tratores, escavadeiras e rolos compactadores que emitem altas concentrações de CO₂ para a atmosfera. Outro processo que contribui significativamente para a emissão de gás carbônico são os transportes de materiais realizados pelas rodovias, que representam um valor de 8%.

Para o aterro com agregado siderúrgico, o processo que mais contribui para a emissão de CO₂ equivalente são os transportes de materiais realizados por caminhões do tipo EURO 3 com carga máxima de 17 toneladas com representação de 48% do total das emissões.

4.2.2 Formação de ozônio

O Gráfico 3 apresenta a formação de ozônio causado por cada um dos aterros. A unidade de medida é o kg de NO_x equivalente.

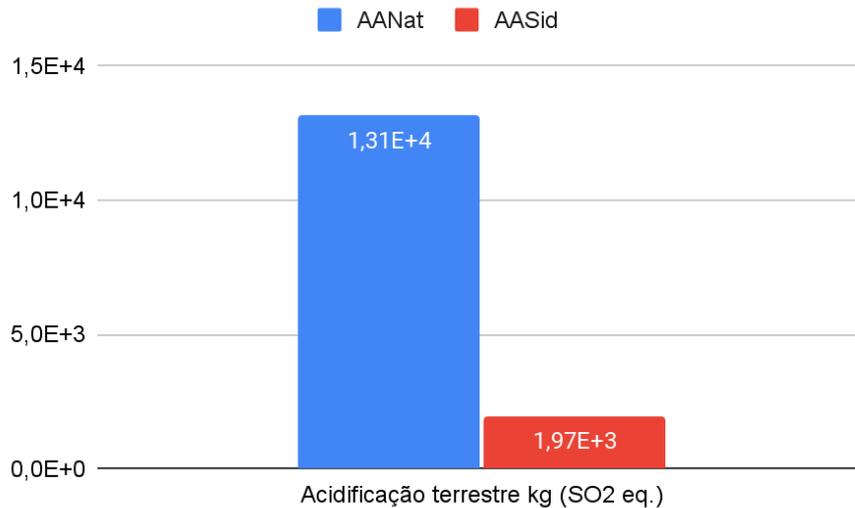
Gráfico 3 - Formação de ozônio, ecossistemas terrestres

Fonte: Autoras, 2023.

Pelo Gráfico 3, pode-se observar que a emissão de NO_x do aterro com agregado siderúrgico representa 21% do valor total do aterro de agregados naturais, sendo que quase 60% da emissão é advinda da etapa de transporte por caminhões. No caso do aterro natural, 55% das emissões são causadas devido ao diesel queimado em máquinas de construção como tratores, escavadeiras e rolos compactadores.

4.2.3 Acidificação

A categoria de impacto acidificação terrestre é apresentada no Gráfico 4 na qual a unidade de medida é kg de SO₂ equivalente.

Gráfico 4 - Acidificação terrestre

Fonte: Autoras, 2023.

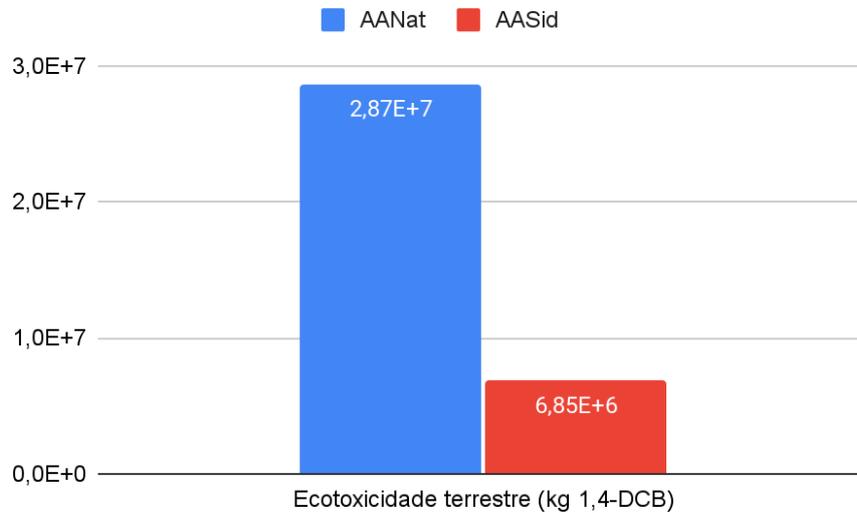
Segundo o Gráfico 4, o aterro com agregado siderúrgico contribui 85% menos para a acidificação terrestre que o aterro com agregados naturais. Sendo o maior responsável por esse impacto a etapa de transporte por caminhões respondendo a mais de 30% do efeito. Para o aterro com materiais naturais, o maior responsável pela acidificação terrestre é o diesel queimado em máquinas de construção como tratores, escavadeiras e rolos compactadores que corresponde a 24% das emissões da categoria.

4.2.4 Ecotoxicidade

Para essa categoria de impacto, foram analisadas 3 subcategorias, sendo elas a ecotoxicidade terrestre, marinha e de água doce.

4.2.4.1 Ecotoxicidade terrestre

A ecotoxicidade terrestre causada pelo aterro natural é cerca de 319% maior que a do aterro com escória, o que pode ser analisado pelo Gráfico 5. Esse resultado foi dado em kg 1,4-DCB (diclobenzeno).

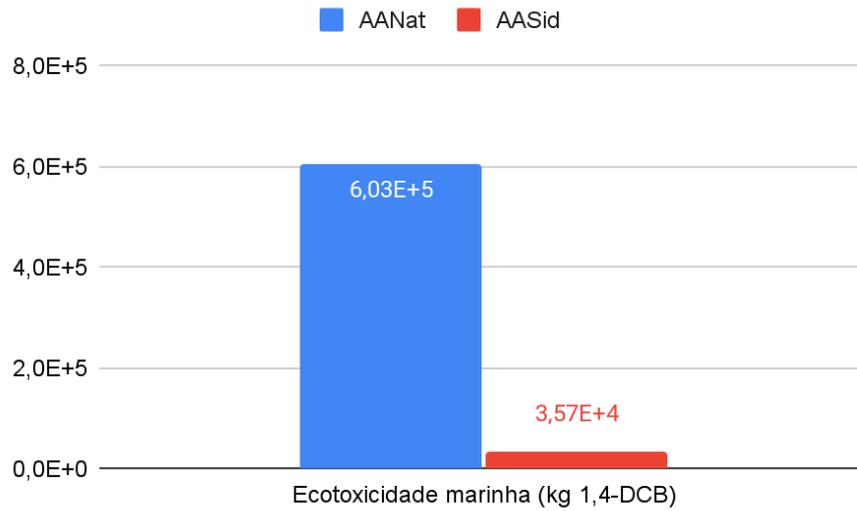
Gráfico 5 - Ecotoxicidade terrestre

Fonte: Autoras, 2023.

De acordo com os dados, mais de 90% da ecotoxicidade causada pelo aterro com materiais naturais é devido a exploração das jazidas de argila. Já para o aterro com agregado siderúrgico, 73% do impacto dessa categoria vem da obtenção da escória, mais especificamente do tratamento de emissões de desgaste dos caminhões de transporte utilizados.

4.2.4.2 Ecotoxicidade marinha

Para essa categoria de impacto, o aterro com agregado siderúrgico corresponde apenas a 6% do impacto em relação ao aterro com agregados naturais. O Gráfico 6 evidencia esses resultados cuja unidade de medida é kg 1,4-DCB (diclobenzeno).

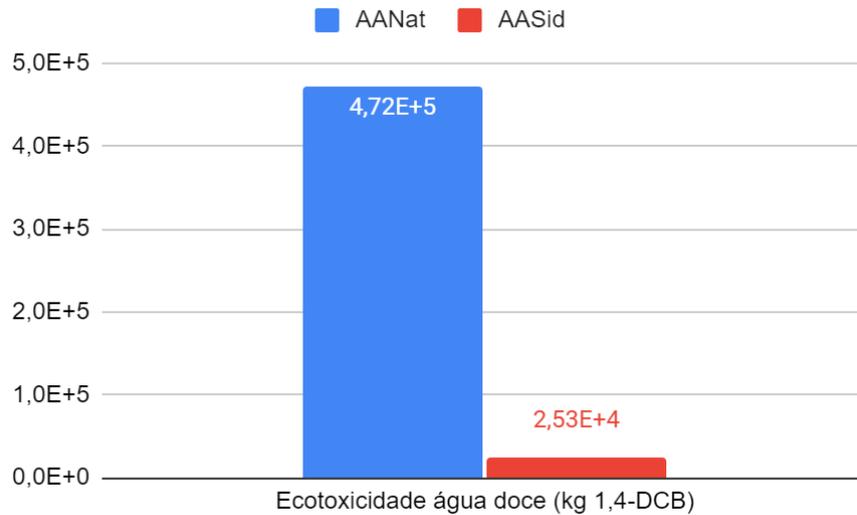
Gráfico 6 - Ecotoxicidade marinha

Fonte: Autoras, 2023.

A ecotoxicidade marinha é causada devido principalmente à exploração da jazida de argila para ambos os aterros. No aterro convencional esse processo corresponde a 98% do impacto enquanto no aterro com agregado siderúrgico, ele é responsável por apenas 61%.

4.2.4.3 Ecotoxicidade água doce

O Gráfico 7 expõe os resultados dessa categoria de impacto cuja unidade de medida é kg 1,4-DCB (diclobenzeno). Nesse caso, o aterro com escória corresponde apenas a 5% do impacto quando comparado com o aterro convencional.

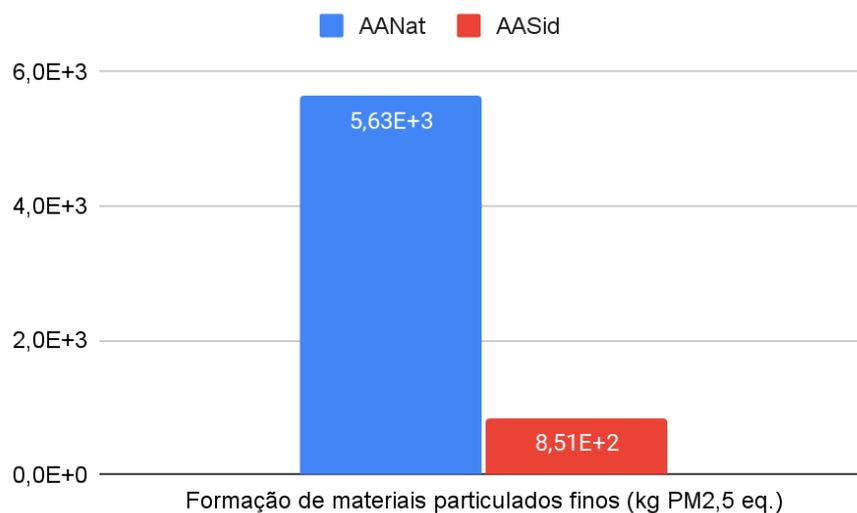
Gráfico 7 - Ecotoxicidade água doce

Fonte: Autoras, 2023.

Assim como na ecotoxicidade marinha, o principal fator que contribui é a exploração da jazida de argila para ambos os aterros. Para o aterro convencional, 98% é devido a esse processo e para o aterro com agregado siderúrgico, apenas 67%.

4.2.5 Material particulado

Para essa categoria de impacto, o Gráfico 8 apresenta a quantificação da formação de material particulado finos para cada um dos processos. Os resultados são dados em kg PM2.5 equivalente.

Gráfico 8 - Formação de material particulados finos

Fonte: Autoras, 2023.

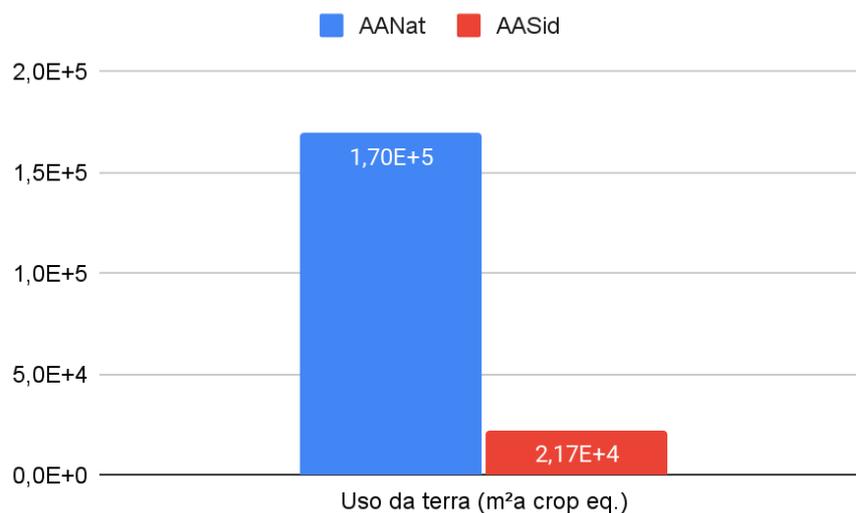
Pode-se atribuir a maior quantidade de material particulado para o aterro convencional a queima de diesel nas máquinas de construção (representando quase 30% desta emissão) como tratores, escavadeiras, rolos compactadores. Somado a isso, processos de obtenção da brita, desde a utilização de explosivos, passando pelos britadores (primário e secundário) e finalizando com o peneiramento do material.

Já no caso do AASid, em que as emissões representam cerca de 15% das emissões do aterro convencional, a maior contribuição é pelo transporte por caminhões, que responsabiliza 30% da formação de material particulado fino.

4.2.6 Uso da terra

O uso da terra foi quantificado com a unidade de metros quadrados de área cultivada equivalente, e seus resultados são apresentados no Gráfico 9. Analisando o gráfico, é seguro inferir que o aterro com agregado siderúrgico causa 87% menos impacto no uso da terra que o aterro convencional.

Gráfico 9 - Uso da terra



Fonte: Autoras, 2023.

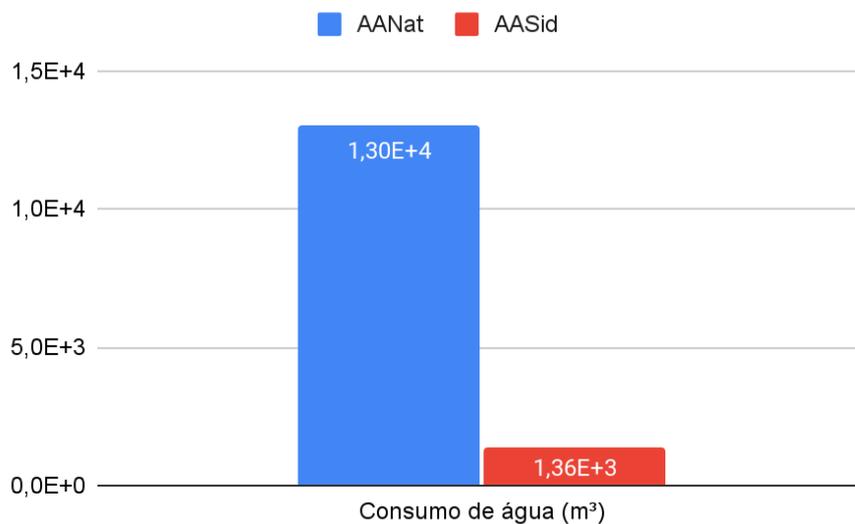
A diferença de análise de ambos os aterros se dá em relação a argila, uma vez que no aterro convencional necessita-se fazer um maior uso desse material que o aterro com agregado siderúrgico. No aterro com brita, esse valor corresponde a cerca

de 48% das emissões, enquanto no aterro com agregado siderúrgico, o valor correspondente é de 13%.

4.2.7 Consumo de água

O uso da água foi quantificado em metros cúbicos (m³). No Gráfico 10 é possível observar a grande diferença no uso de água em cada um dos aterros – quase dez vezes maior no aterro com brita, principalmente advindo da menor utilização da argila para o aterro com escória que demandará menor quantidade de água para atingir o teor de umidade ótimo da argila.

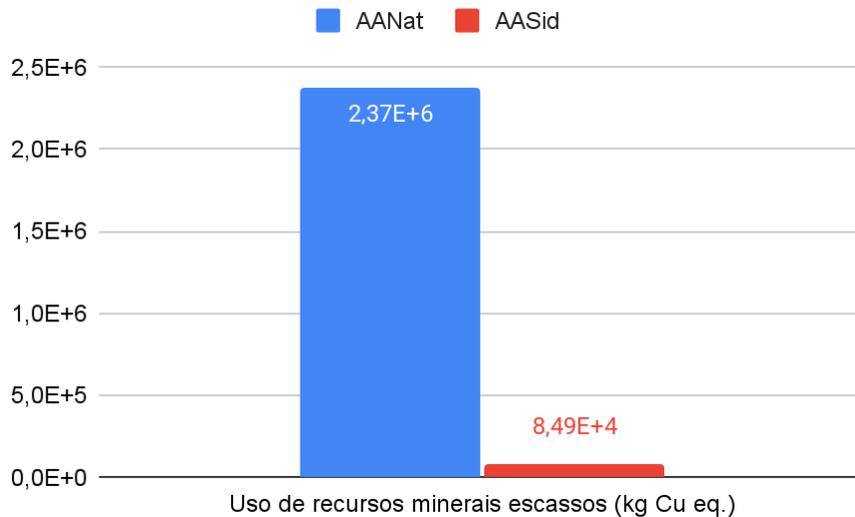
Gráfico 10 - Consumo de água



Fonte: Autoras, 2023.

4.2.8 Uso de recursos minerais escassos

O Gráfico 11 apresenta em kg de cobre equivalente a quantificação da escassez de recursos minerais que cada uma das soluções causa. No caso do aterro com agregado siderúrgico, o impacto é 96% menor que o do aterro comum.

Gráfico 11 - Uso de recursos minerais escassos

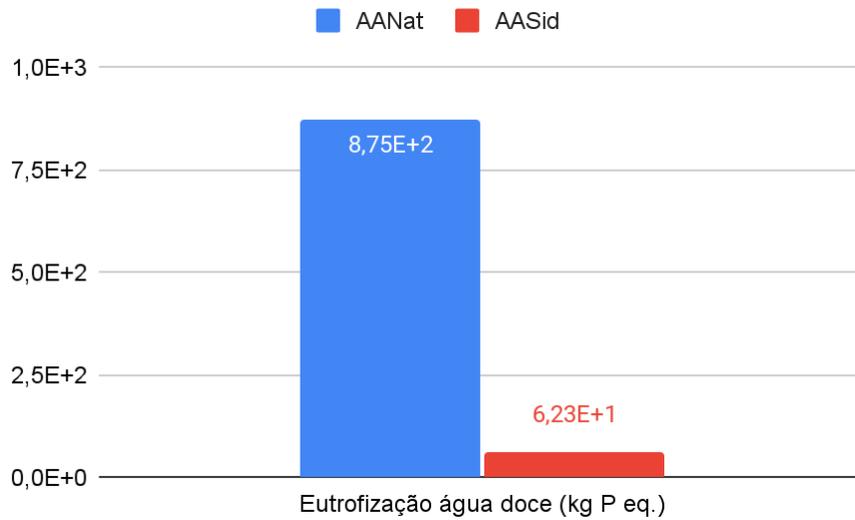
Fonte: Autoras, 2023.

Para ambos os aterros, o processo que mais contribui nessa categoria de impacto é a obtenção da argila, respondendo a aproximadamente 96% do impacto gerado.

Vale ressaltar que o impacto advindo da extração do agregado natural não representa grande relevância ambiental estritamente do ponto de vista do uso de recursos minerais, embora outros impactos em categorias distintas sejam alavancados por tal extração. Pode-se explicar tal fato pela abundância do recurso explorado no cenário atual.

4.2.9 Eutrofização água doce

O Gráfico 12 apresenta os valores dos resultados de eutrofização da água doce dados em kg fósforo equivalente. É possível notar, que os impactos do aterro com agregado siderúrgico são 93% menores que do aterro com brita.

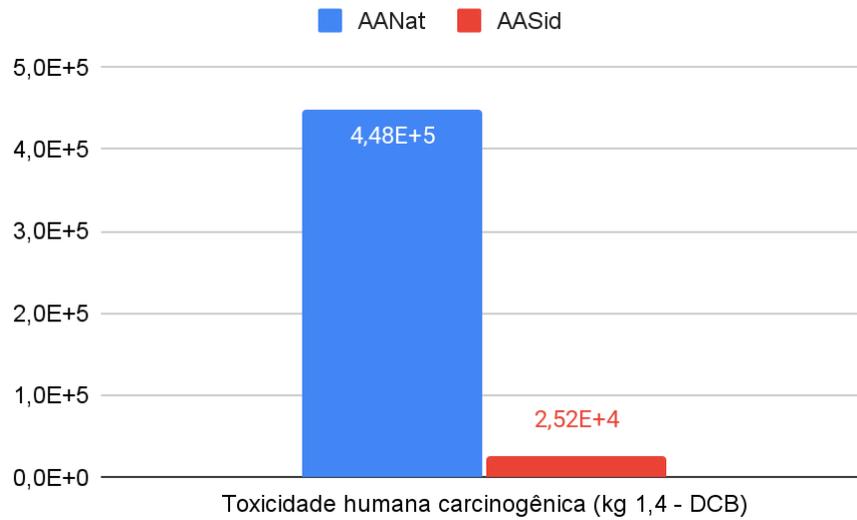
Gráfico 12 - Eutrofização água doce

Fonte: Autoras, 2023.

O processo que mais contribui para que aconteça a eutrofização da água doce é o tratamento estéril da mineração de carvão associada a etapa de exploração da jazida de argila. Nesse caso, para o aterro convencional, esse processo corresponde a 97% do impacto, enquanto no aterro com agregado siderúrgico o valor é de 51%.

4.2.10 Toxicidade humana carcinogênica

Os valores dos resultados de toxicidade humana carcinogênica dados em kg 1,4 - DCB estão contidos no Gráfico 13. É possível notar que os impactos do aterro com escória correspondem a apenas 6% dos impactos totais do aterro convencional.

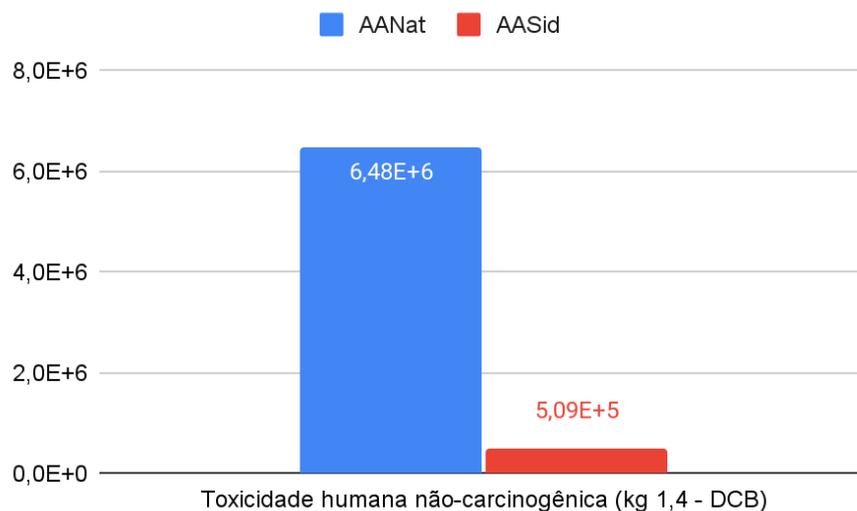
Gráfico 13 - Toxicidade humana carcinogênica

Fonte: Autoras, 2023.

Nessa categoria, para ambos os sistemas de produto, o maior impacto está na exploração da jazida de argila representando mais de 98% da contribuição nessa categoria de impacto para o aterro com materiais naturais e 64% para o aterro com agregado siderúrgico.

4.2.11 Toxicidade humana não-carcinogênica

Para essa categoria, o Gráfico 14 apresenta os valores para ambos os sistemas de produto, no qual o aterro convencional contribui 117% mais que o aterro com agregados siderúrgicos.

Gráfico 14 - Toxicidade humana não-carcinogênica

Fonte: Autoras, 2023.

Para o aterro com agregado siderúrgico, o processo que mais contribui nessa categoria de impacto é a exploração da jazida de argila, respondendo a 47% do impacto, já para o aterro convencional, 97%.

4.3 Normalização e ponderação

De acordo com Pizzol et al. (2017), a normalização pode ser definida como o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores das categorias de impacto em relação às informações de referência e ponderação de forma a converter e agregar aos resultados dos indicadores nas categorias de impacto usando fatores numéricos com base em escolhas de valor.

Com base no método de AICV Recipe 2016 Midpoint (H) e no método de normalização e ponderação World 2010 (H), foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 15 que representam a normalização e padronização relativa à média mundial de um indivíduo ao ano.

Tabela 15 - Normalização e ponderação

Categoria de impacto	AANat	AASid
Ecotoxicidade marinha	5,85E+5	3,46E+4
Ecotoxicidade água doce	3,85E+5	2,06E+4
Toxicidade humana carcinogênica	1,62E+5	9,09E+3
Toxicidade humana não-carcinogênica	4,35E+4	3,42E+3
Ecotoxicidade terrestre	2,77E+4	6,61E+3
Eutrofização água doce	1,35E+3	9,60E+1
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	8,88E+2	1,87E+2
Formação de ozônio, saúde humana	7,50E+2	1,59E+2
Recursos minerais fósseis	5,63E+2	1,63E+2
Acidificação terrestre	3,20E+2	4,80E+1
Aquecimento global	2,49E+2	6,10E+1
Formação de materiais particulados finos	2,20E+2	3,33E+1
Radiação ionizante	1,04E+2	1,73E+1
Consumo de água	4,88E+1	5,10E+0
Uso da terra	2,75E+1	3,52E+0

Depleção do ozônio estratosférico	2,28E+1	3,41E+0
Uso de recursos minerais escassos	1,98E+1	7,07E-1
Eutrofização marinha	1,19E+1	1,00E+0

Fonte: Autoras, 2023.

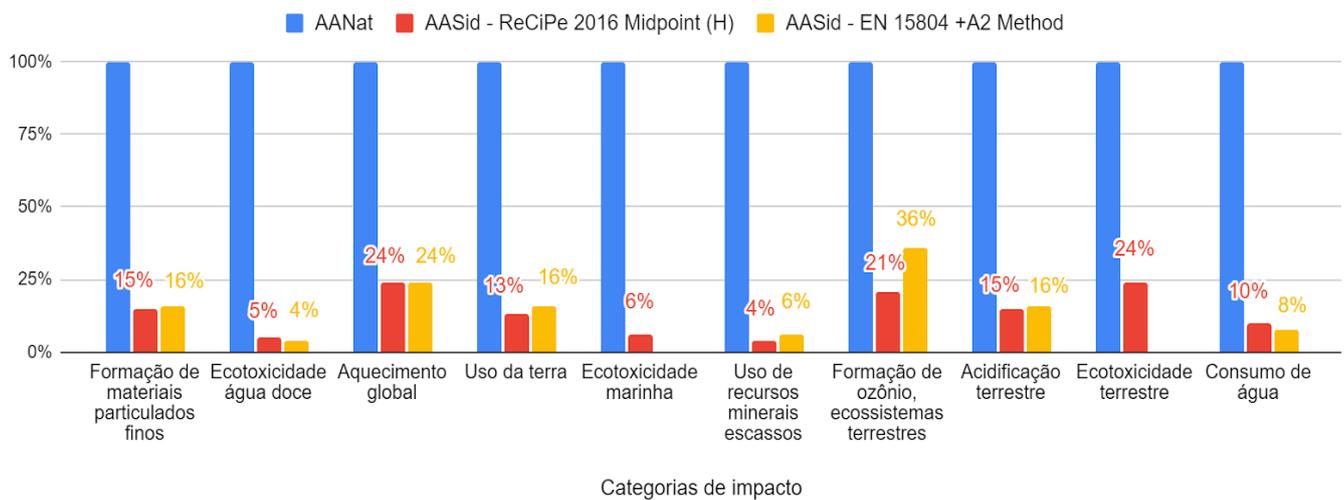
Pelos resultados apresentados pode-se inferir que do ponto de vista da ecotoxicidade marinha, o aterro com brita gera 5850 mil vezes mais emissões que um indivíduo ao longo do ano.

Para ambas as análises, a categoria de impacto que apresentou maior valor na normalização foi a ecotoxicidade marinha, embora o aterro com agregado siderúrgico tenha apresentado valor aproximadamente 94% menor que o aterro convencional.

Vale ressaltar que a categoria de impacto Recursos Minerais Escassos não apresentou valores significativos na ponderação. Entretanto, isso não indica que essa categoria não requer uma análise detalhada. Uma vez que, esse método de normalização considera apenas recursos minerais escassos como média mundial, sendo que existem regiões que ainda dispõem de forma abundante dos materiais utilizados. Cabe ainda destacar que, de forma direta e indireta, a extração de recursos minerais contribui para acréscimo de impacto ambiental em outras categorias como aquecimento global e consumo de água. Sendo assim, pode-se concluir que essa é uma das limitações do estudo em questão. Nesse contexto, cabe discutir ainda sobre os impactos associados à extração de brita que não são considerados pelo estudo de ACV, como impacto visual da mina exaurida e depleção local de recurso mineral, o que pode torná-lo regionalmente escasso, mesmo que em um cenário nacional ou global este recurso continue abundante.

4.4 Comparação entre métodos de AICV

O Gráfico 15 apresenta a comparação entre duas metodologias de AICV (ReCiPe 2016 Midpoint (H) e EN 15804 +A2 Method) conforme mencionado no item 4.1.5.

Gráfico 15 - Comparação entre métodos de AICV

Fonte: Autoras, 2023.

Pelos resultados do Gráfico 15, é possível comprovar que mesmo analisando por duas metodologias distintas, os valores para as mesmas categorias de impacto foram bastante semelhantes. É válido lembrar que algumas categorias não são contempladas na metodologia EN 15804 +A2 Method, nesse caso, as categorias de impacto de ecotoxicidade marinha e terrestre.

As categorias de impacto ecotoxicidade marinha e terrestre não possuem barras contempladas do método EN 15804+A2 e por esse motivo os resultados apresentados no item 4.2 foram todos para o método ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Percebe-se que a maior diferença ocorreu na categoria Formação de ozônio, com 15 pontos percentuais de diferença entre um método e outro, enquanto as demais categorias diferiram apenas 1 a 2 pontos percentuais. Além disso, o método EN 15804+A2 tende a resultar em maiores valores, somente duas categorias apresentaram valores menores por esse método sendo a ecotoxicidade em água doce e o consumo de água.

A similaridade dos resultados expressa no gráfico acima atesta não somente a confiabilidade da metodologia de AICV utilizada, bem como os resultados obtidos no estudo.

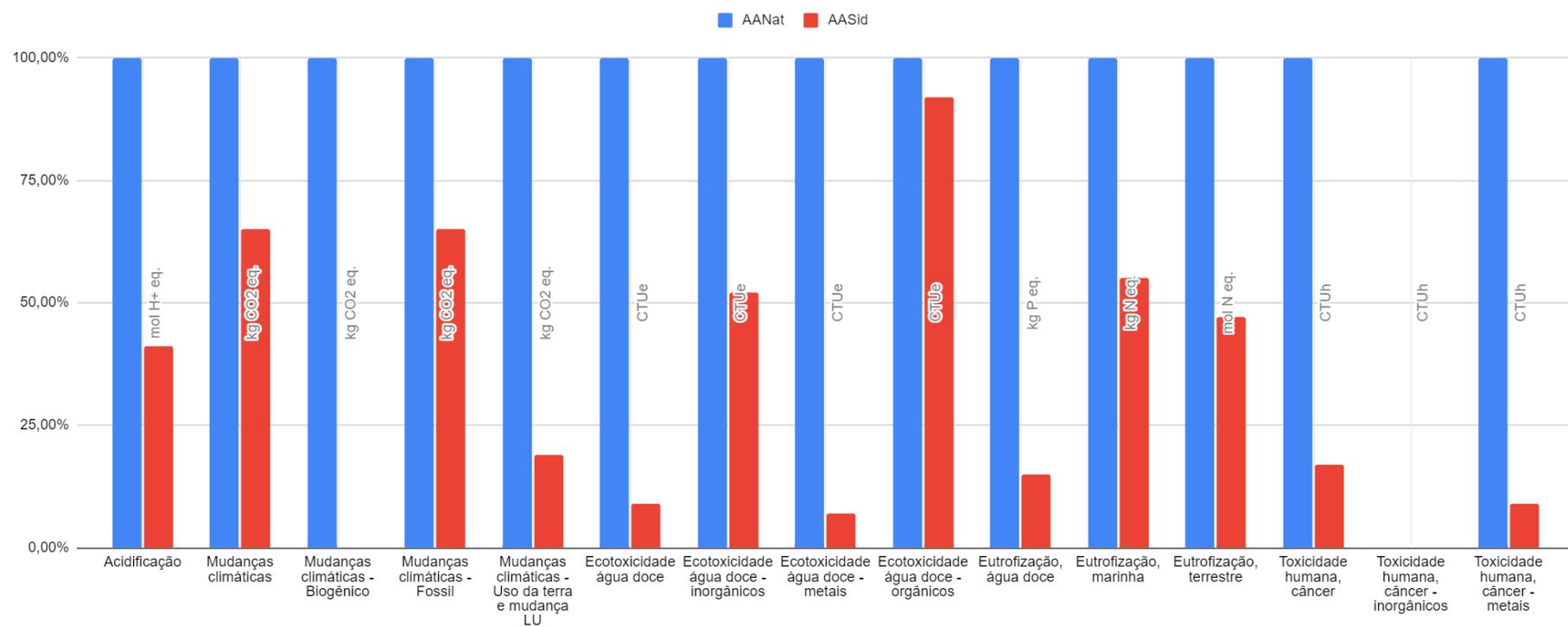
4.5 Análise de sensibilidade

De acordo com Rosenbaum (2012), a análise de sensibilidade pode ser definida como o efeito da mudança de uma única entrada nos resultados de um estudo de ACV. Sendo assim, a distância entre a indústria siderúrgica e o local da obra foi aumentada, mantida todas as outras entradas inalteradas, incluindo as distâncias da jazida de argila e da pedreira, para os dois métodos de AICV. O objetivo foi verificar até que distância a obra pode estar da indústria siderúrgica de forma que os impactos ambientais na construção do aterro sejam menores que do agregado britado.

4.5.1 Análise de sensibilidade - EN 15804 + A2 Method.

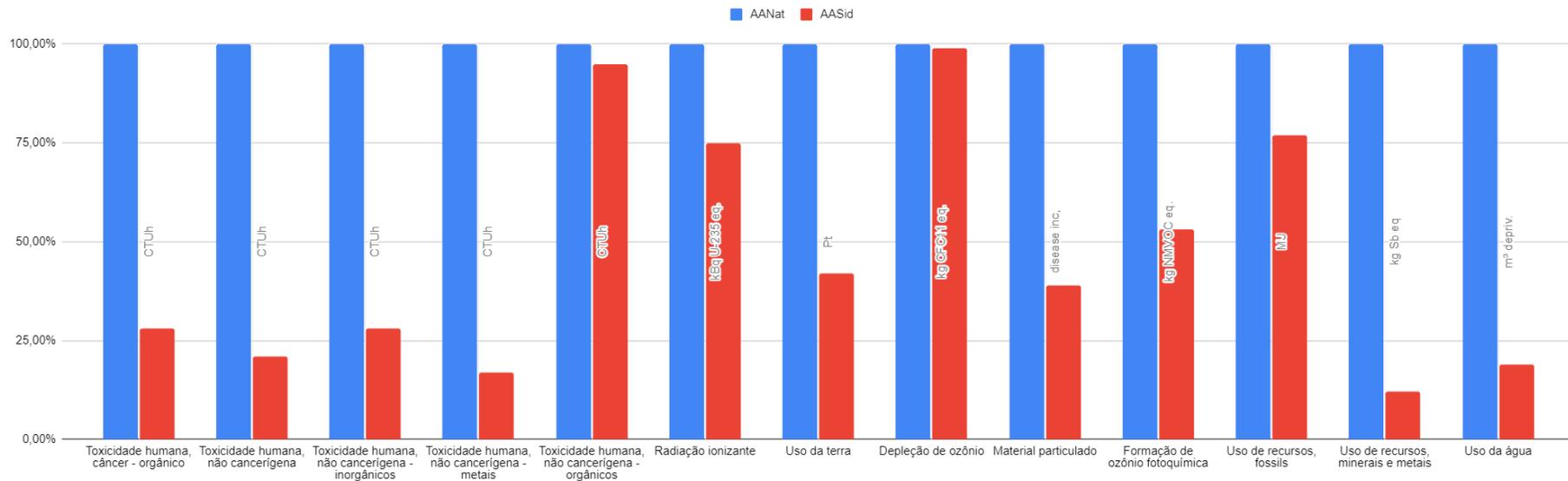
Os Gráficos 16 e 17 exibem os resultados para o método de AICV EN 15804 + A2 Method no qual aumentou-se a distância entre a indústria siderúrgica e o local da obra de 50 km para 187 km.

Gráfico 16 - Análise de sensibilidade utilizando o método EN 15804 + A2 Method



Fonte: Autoras, 2023.

Gráfico 17 - Análise de sensibilidade utilizando o método EN 15804 + A2 Method



Fonte: Autoras, 2023.

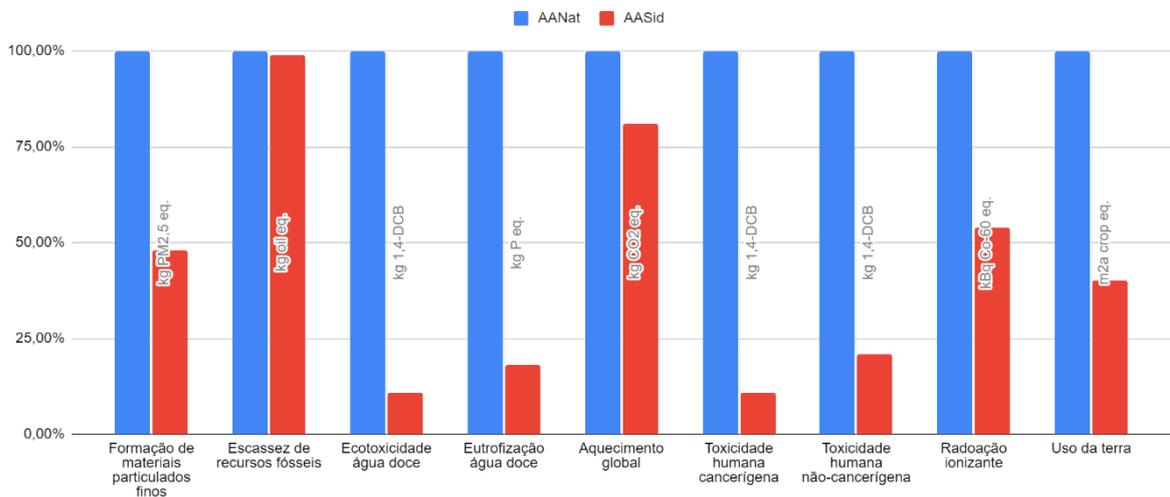
Acima de 187 km, a categoria de impacto depleção de ozônio apresenta o mesmo impacto ambiental do aterro convencional e por isso essa distância não foi mais aumentada. Determinou-se, portanto, que a distância de 187 km é o limite de distância para a superioridade plena do aterro com agregado siderúrgico em comparação com o agregado natural. Nos Gráficos 16 e 17, também é possível perceber que para outras categorias de impacto, mesmo com o aumento da distância, o impacto do uso da escória chega a ser até 90% menor. A categoria de impacto Toxicidade humana, câncer inorgânicos não possui valores explícitos pois para ambos

os aterros sua contribuição é insignificante. Cabe destacar que essa comparação foi feita apenas pela ótica ambiental da implementação de ambos os aterros, não considerando os possíveis efeitos econômicos.

4.5.2 Análise de sensibilidade - RECIPE 2016 MIDPOINT (H)

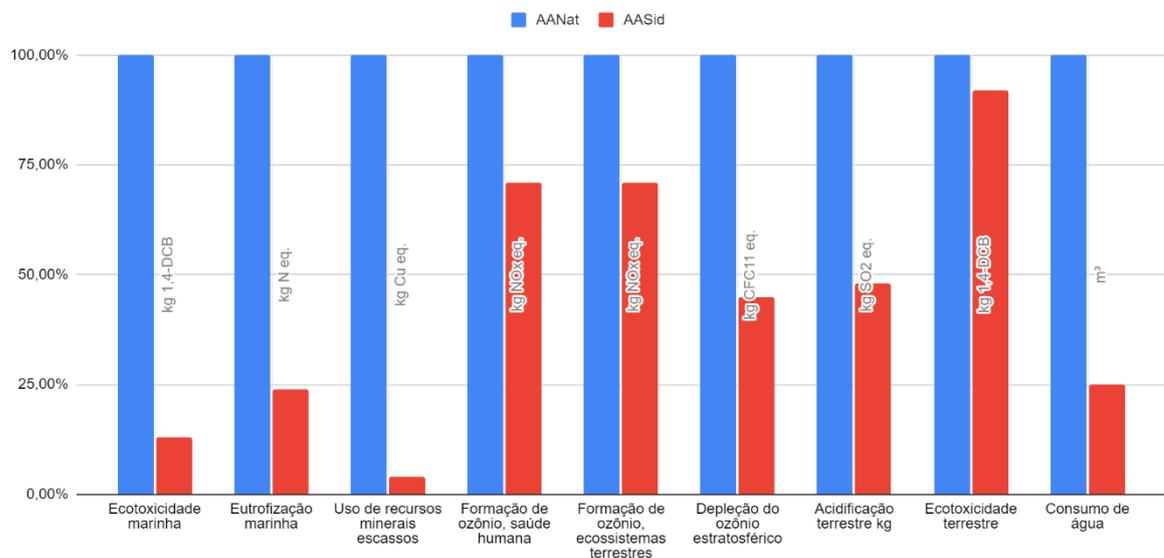
Os Gráficos 18 e 19 exibem os resultados para o método de RECIPE 2016 MIDPOINT (H) no qual aumentou-se a distância entre a indústria siderúrgica e o local da obra de 50 km para 243 km.

Gráfico 18 - Análise de sensibilidade utilizando o método RECIPE 2016 MIDPOINT (H)



Fonte: Autoras, 2023

Gráfico 19 - Análise de sensibilidade utilizando o método RECIPE 2016 MIDPOINT (H)



Fonte: Autoras, 2023

De maneira análoga ao discutido anteriormente, para distâncias superiores a 243 km, a categoria de impacto escassez de recursos fósseis fica com o mesmo impacto ambiental do aterro convencional e essa distância torna-se o limite de superioridade plena do uso de agregado siderúrgico em comparação ao agregado natural. No Gráfico 17, também é possível perceber que para outras categorias de impacto, mesmo com o aumento da distância, o impacto do uso da escória chega a ser até 80% menor. Novamente destaca-se que os impactos financeiros não foram avaliados.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O referido estudo teve como objetivo comparar o aterro com materiais convencionais com o aterro com agregado siderúrgico. Também foi proposto conduzir a análise de sensibilidade utilizando dois métodos de AICV (ReCiPe 2016 Midpoint (H) e EN 15804 +A2 Method) buscando verificar até que distância o agregado siderúrgico pode estar das obras de aterro sem causar mais impactos ambientais que os materiais convencionais. Por fim, foi realizada simulação de normalização e de ponderação com o intuito de interpretar os resultados obtidos verificando a magnitude dos mesmos. Assim, é possível concluir que:

- Em todas as categorias de impacto analisadas os impactos ambientais do aterro com agregados convencionais foram muito maiores que no aterro com agregados siderúrgicos. O agregado siderúrgico apresentou valores de no máximo 24% de impacto ambiental em relação ao agregado natural. Para algumas categorias de impacto o uso do agregado siderúrgico apresentou um valor de 5% do potencial do impacto do aterro convencional.
- Para o agregado natural, o processo mais relevante das categorias de impacto é a queima de diesel em máquinas de construção como tratores, escavadeiras e rolos compactadores. Vale lembrar que esses equipamentos também são utilizados para o aterro com agregado siderúrgico, porém por tempos menores devido às necessidades construtivas.
- Para o agregado siderúrgico verificou-se que o processo que mais influência nas categorias de impacto analisadas foi o transporte realizado por caminhões do tipo EURO 3 com capacidade de 17 toneladas.
- Pela análise de sensibilidade, pode-se concluir que a distância de até 187 km da indústria siderúrgica à obra, ainda se mostra favorável para o emprego do agregado siderúrgico, uma vez que os impactos causados pela brita não são superados em nenhuma das categorias de impacto. Vale salientar que, algumas dessas categorias, como ecotoxicidade e uso de recursos minerais, mantêm uma diferença significativa de cerca de 90% menos impacto que o aterro com materiais convencionais.

- A normalização evidenciou que para a análise individual de cada um dos aterros, a categoria de impacto ecotoxicidade marinha foi a que obteve maior magnitude.
- A comparação entre os métodos de AICV comprovou que para as categorias de impacto analisadas, o uso do agregado siderúrgico causa menor impacto frente ao agregado convencional, evidenciando que mesmo olhando para diferentes metodologias é possível chegar no mesmo potencial de impacto.
- Os resultados apresentados demonstraram que a ACV é uma ferramenta eficaz para análise de impactos ambientais de obras similares. Entretanto, a falta de uma base de dados aplicada à realidade brasileira se torna uma grande limitação da aplicabilidade desta ferramenta. Bem como, métodos de AICV que também sejam moldados às características encontradas no país. Assim, torna-se necessária a utilização e adaptação de modelos e métodos aplicados à realidade de países estrangeiros. Apesar disto, podemos considerar válidos todos os resultados obtidos.
- Assim, é válido afirmar que a aplicação de agregados siderúrgicos em detrimento da brita é plenamente superior do ponto de vista ambiental até uma distância de cerca de 187 km da indústria siderúrgica. Com isso, acaba sendo gerada uma economia circular, em que ambas as indústrias cooperam entre si, sendo uma aplicação com vantagens técnicas e ambientais e permitindo o escoamento de um material sem destinação específica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Repetir a ACV utilizando a base de dados mais recente (eco invent 3.8) ou utilizando outra base de dados como a BioEnergieDat;
- Realizar uma comparação com outro software de ACV, como o Sima Pro;
- Realizar o estudo da ACV econômica com base nos materiais aplicados e transporte dos mesmos;
- Realizar o estudo da ACV social com base nas condições de trabalho para cada um dos materiais aplicados.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Janilton de Lima. **Impactos ambientais provocados pela extração de argila no Município de Ibiassucê-BA**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 09, Vol. 03, pp. 35-46. setembro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/extracao-de-argila>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/extracao-de-argila

ALMEIDA, M. MARQUES, M. **Aterros sobre solos moles - projetos e desempenhos**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2014.

Araújo, W. P.; De Lima, M. M. C; Solimani, L. C. S. (2015); **Escória de aciaria LD para uso como corretivo agrícola**. ABM Week, Rio de Janeiro.

ArcelorMittal Brasil. **Catálogo de coprodutos, 2021**. Minas Gerais: 2021. 40p. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/manual-de-coprodutos-joao-monlevade?asCatalogo=pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2022.

Argila: o que é e para que serve. **Ecycle**, 2022. Disponível: <<https://www.ecycle.com.br/argila/>>. Acesso em: 18 ago. 2022.

Arteris - Centro de desenvolvimento tecnológico. **Especificação Particular de Serviço para Terraplenagem – Execução de Aterros. Designação ARTERIS ES 108- Rev. 02; 2019**.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2014). **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2014). **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016). **ABNT ISO/TR 14047: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como**

aplicar a **ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2014). **ABNT ISO/TS 14049: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018). **ABNT ISO/TS 14071: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Processo de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2019). **ABNT ISO/TS 14072: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2022). **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**; Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2004). **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação - Anexo G: Padrões para o ensaio de solubilização**; Rio de Janeiro, ABNT.

Avaliação do Ciclo de Vida. **Ciclog (Grupo de pesquisa em Avaliação do Ciclo de vida)**. Disponível em: <<https://ciclodevida.ufsc.br/avaliacao-do-ciclo-de-vida/>>. Acesso em: 21 jul. 2022.

Banco de dados Ecoinvent. **Ecoinvent**. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

Benefits of building with clay. **Wienerberger**, 2022. Disponível em; <<https://www.wienerberger-building-solutions.com/Expertise/Our-expertise/Benefits-of-building-with-clay.html>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de vegetação rodoviária. vol.**

1: Implantação e recuperação de revestimentos vegetais rodoviários. Rio de Janeiro, 2009.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de vegetação rodoviária. vol. 2: Flora dos ecossistemas brasileiros.** Rio de Janeiro, 2009.

CARVALHO, Juliana de. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil: estudo de caso - comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos.** 2002. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. . Acesso em: 19 ago. 2022.

CHOI, Ahelstan K. Y., **A Screening Method for Life-Cycle Inventory Analysis for Industrial Material.** Dissertação de Mestrado. University of Windsor, 1994.

COLTRO, Leda. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão.** Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA / ITAL. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5509246/mod_resource/content/2/01.2%20COLTRO_Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20ciclo%20de%20vida-ACV.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – **DNER 037/94 – Solo-determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do óleo.** Mato Grosso, 1994. 03 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – **DNER 092/94 – Solo-determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia.** Mato Grosso, 1994. 05 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – **DNIT 381/2021 – PRO – Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias.** Brasília, 2021. 35 p.

De Schryver AM, Van Zelm R, Humbert S, Pfister S, McKone TE, Huijbregts MAJ (2011). **Value choices in life cycle impact assessment of stressors causing human health damage.** Journal of Industrial Ecology 15 (5):796–815.

DONEY, Scott C. et al. **Os impactos da acidificação dos oceanos nos ecossistemas marinhos e nas comunidades humanas dependentes**. Revisão Anual de Meio Ambiente e Recursos , v. 45, n. 1 de janeiro de 2020.

DEUTSCH, L. **Avaliação do ciclo de vida de um sistema de geração de energia, incorporando gestão de risco: estudo de caso aplicado ao reservatório de vinhaça de uma refinaria sucroenergética**. Tese de doutorado. Brasília. Novembro de 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/34624/1/2018_LeopoldoDeutsch.pdf>. Acesso em: 18/01/2023.

Ecoinvent. **ACV Brasil**. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/software/ecoinvent>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

Efeitos do material particulado (PM) na saúde e no meio ambiente. **Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA)**. Disponível em: <<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

FERREIRA, C. S.; CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JUNIOR, I.. Eutrofização: aspectos conceituais, usos da água e diretrizes para a gestão ambiental. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, Aquidabã, v.6, n.1, p.65-77, 2015. DOI:<http://dx.doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2015.001.0006>

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos**. Documento técnico, Instituto Politécnico de Viseu. 2004.

Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvaal, T.; Guinée, J. Heijungs, R. Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S. (2009); “**Recent developments in Life Cycle Assessment**”, Journal of Environmental Management, 91, 1-21.

GODINHO, Iasmin Ferreira da Cruz. **Ecotoxicidade do plástico em ambiente marinho–contributos para um modelo de impacte ambiental**. 2021. Tese de Doutorado.

Goedkoop M, Effting S, Collignon M (2000) **The Eco-Indicator 99 – a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment**, Manual for Designers. 2 ed. Amersfoort, Product Ecology Consultants.

GUERRA, ANTONIO TEIXEIRA; SILVA, ANTONIO SOARES DA; BOTELHO, ROSANGELA GARRIDO MACHADO. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 339 p. ISBN 978-85-286-0738-3. BERTONI, JOSÉ; LOMBARDI NETO, FRANCISCO. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p. (Coleção Brasil Agrícola) ISBN 978-85-274-0980-3

Guia básico de Análise do Ciclo de Vida (ACV). **Enciclo**. Disponível em: <<http://www.anagea.org.br/wp-content/uploads/Guia-B%C3%A1sico-de-An%C3%A1lise-do-Ciclo-de-Vida-ACV.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2022.

GUINE, J. B. et al. **Life cycle assessment. An operational guide to ISO standards**, vols, p. 1-3, 2002.

Han, F., Zhang, Z., Wang, D., Yan, P., 2015. **Hydration heat evolution and kinetics of blended cement containing steel slag at different temperatures**. *Thermochim. Acta* 605, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.02.018>.

Houschild, M. Z.; Rosenbaum, R. K.; Olsen, S. I. **Life Cycle Assessment: theory and practice**. Montpellier: Springer, 2018.

Howell, B.; **Top 7 Most Polluting Industries in 2023**, disponível em: <<https://www.theecoexperts.co.uk/blog/top-7-most-polluting-industries>>. Acesso em: 28 de dezembro de 2022.

HUIJBREGTS, Mark AJ et al. **ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization**. 2016.

Hunt, R. e Franklin, E., (1996). **LCA - How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA**. *Int. J. LCA*, vol. 1 (1) 4-7. Landsberg, Germany: Ecomed.

JUNGES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T.; SANTOS, F. A. C. (2018). **Efeito estufa e Aquecimento Global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica**. *Experiências em Ensino de Ciências*, vol. 13, n. 5, p. 126-151. http://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID531/v13_n5_a2018.pdf.

KLÖPFER, Walter. **Life Cycle Assessment. Environmental Science and Pollution Research** , v. 4, n. 4, pág. 223-228, 1997.

KULAIIF, Yara. **Produção de argilas no Brasil**. 21 de junho de 2012.

KULAY, Luiz Alexandre, SEO, Emilia Satoshi Miyamaru. **Orientações conceituais para elaboração de Inventários de Ciclo de Vida. InterfacEHS - Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, São Paulo, v. 5, n. 1, Artigo 1, p. (1-31), jan.\abr., 2010.

Guilin Li; Jie Chen; Zhiying Sun; Manzhi Tan (2007). **Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes**. , 27(7), 2715–2724. doi:10.1016/s1872-2032(07)60059-6

LIMA, Willian Dos Reis. **Modelagem do fator de compensação “K” da equação de balanço de quantidade de movimento em banho metálico no LD**. Dissertação de mestrado, Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2021.

LIU, Wei et al. **Stratospheric ozone depletion and tropospheric ozone increases drive Southern Ocean interior warming**. Nature Climate Change, v. 12, n. 4, p. 365-372, 2022.

MACHADO, Layza V. S. S., **Avaliação do deslocamento vertical de aterro sobre solo mole executado no projeto de duplicação da BR-101/PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

Manta Geotêxtil. **Total solo**, 2022. Disponível em: <<https://www.totalsolo.com.br/produtos/manta-geotextil/>>. Acesso em: 14 dez. 2022.

MARANGON, M. **Geotecnia de fundações**. 2009. p. 46–89.

MASSAD, F. **Obras de Terra. Curso Básico de Geotecnia**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2003.

MASSOCCO, Narayana Saniele. **Análise de estabilidade de um aterro sobre solo mole e medidas de melhorias nas condições do solo**. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. 2017.

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.) et. al. **Introdução a siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p.

Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL). **Boletim de logística a importância do modo rodoviário para o Brasil projeto BRA 13/013**. Brasília, 2022.

OLIVEIRA, Evelyn Bloem Souto. **Aterros sobre solos moles - notas de aula**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 2021.

OLIVEIRA, Pablo Henrique Araújo. **Determinar a viabilidade da implantação de uma pedreira para a produção de brita na cidade de Palmas no estado do Tocantins**. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, p. 19. 2014.

O que é a brita e como ela pode ser usada. **Grupo estrutural**, 2018. Disponível em: <<http://www.grupoestrutural.com.br/o-que-e-brita-e-como-ela-pode-ser-usada/>>.

Acesso em: 11 ago. 2022.

Os diferentes tipos de brita e suas utilidades. **Instituto Minere**, 2020. Disponível em: <<https://institutominere.com.br/blog/os-diferentes-tipos-de-brita-e-suas-utilidades>>.

Acesso em: 11 ago. 2022.

O software de avaliação de ciclo de vida de código aberto e de alto desempenho líder mundial. **OpenLCA**. Disponível em: <<https://www.openlca.org/>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

O que é Avaliação do Ciclo de Vida. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT)**, 2022. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>.

Acesso em: 23 mai. 2022.

O que é SICV Brasil. **Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT)**, 2022. Disponível em: <<https://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>>.

Acesso em: 21 nov. 2022.

O termômetro da construção. **Revista Grandes Construções**, 2022. Disponível em: <<https://grandesconstrucoes.com.br/Noticias/Exibir/25469>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

PEREIRA, Érica Flávia dos Santos; PEREIRA, Andréa Franco. **Modelo do Inventário de Ciclo de Vida: Embasamento Ambiental para Design de Ambientes**. MIX Sustentável, v. 8, n. 3, p. 19-34, mai. 2022. ISSN-e: 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. DOI: <<http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.19-34>>.

Pfister S, Koehler A, and Hellweg S. 2009. **Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA**. Environmental Science & Technology 43 (11):4098-4104.

Pizzol, M., Laurent, A., Sala, S. et al. **Normalização e ponderação na avaliação do ciclo de vida: quo vadis ?**. Avaliação do Ciclo de Vida Int J 22 , 853–866 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1199-1>

PRADO, M. R. ; KASKANTZIS NETO, G. **A Análise do Ciclo de Vida como Ferramenta de Otimização de Processos e Gestão Ambiental**. REPV - Revista Eletrônica Polidisciplinar Voos- ISSN 1808-9305 Núcleo de Estudos da Sociedade Contemporânea - NESC. p. 1-11, dez. 2005.

PULGROSSI, L. M.; SILVA, V. G. da. **Influência de regras de corte de inventário nos resultados de ACV de edificações**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 11, p. e020026, 2020. DOI: 10.20396/parc.v11i0.8658259. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8658259>. Acesso em: 17 jan. 2023.

RANGEL, C. M. A. F., LIMA, F. M. R.S., ALVARADO, L. M. T. **Avaliação do ciclo de vida do pós-uso da construção civil: um estudo de caso da demolição no Rio de Janeiro = Evaluation of the life cycle of the post-use of civil construction: a case study of demolition in Rio de Janeiro**. In: ANAIS DA JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 26. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. 5p.N;

Riva, C., Roumpedakis, TC, Kallis, G., Rocco, MV, & Karellas, S. (2021). **Análise do ciclo de vida de uma bomba de calor reversível acionada por energia fotovoltaica**. *Energy and Buildings*, 240, 110894. doi:10.1016/j.enbuild.2021.11089

ROSENBAUM, R. K. Interpretation: **Uncertainty and sensitivity. Material didático da disciplina Life Cycle Assessment of Products and Systems.** Division for Quantitative Sustainability Assessment, DTU Management Engineering, Technical University of Denmark, 2012

Saade MRM, Silva MG, Gomes V (2014). **A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais.** Natureza on line 12 (3): 109-116.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida. **Laboratório de Materiais de Construção Civil.** Bacharel em Engenharia Civil. 2020. Notas de aula. Universidade Federal do Espírito Santo.

SCOPUS, Pesquisa das palavras chaves “Life Cycle Assessment”, disponível em <<https://www.scopus.com/sources.uri?zone=TopNavBar&origin=sbrowse>>, 17 de Agosto de 2022.

SCOPUS, International Journal of Life Cycle Assessment, disponível em <<https://www.scopus.com/sourceid/23271>>, 18 de Janeiro de 2022.

SESANA, Elena e cols. **Impactos das mudanças climáticas no patrimônio cultural: Uma revisão da literatura.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change , v. 12, n. 4, pág. e710, 2021.

SILVA, G. A. KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: VILELA JÚNIOR, A. e DEMAJOROVIC, J. (Org.). **Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental - Desafios e Perspectivas para as Organizações.** 1 ed. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2006.

SILVA, V. G; SILVA, M. G. Análise do Ciclo de Vida Aplicada ao Setor de Construção Civil: Revisão da Abordagem e Estado Atual. Conferência: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC 2000 | Modernidade e Sustentabilidade em: Salvador, BA, Brasil, de 24 a 28 de abr. 2000. Volume 1

SimaPro. **ACV Brasil.** Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/software/simapro>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

Souza, A. L. G. P. O; Carpes, L. F. **Contribuição à Aplicação da Análise de Ciclo de Vida na Indústria Cimenteira: uma Revisão Bibliográfica**. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, p. 21. 2012.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**. (Tese - Doutorado), Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, p. 45-47. 2006.

Tipos de brita: Conheça as diferenças. **Mapa da obra**, 2016. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/conheca-os-tipos-de-brita/>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

Umberto LCA+. **ACV Brasil**. Disponível em: <<https://acvbrasil.com.br/software/umberto-lca>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

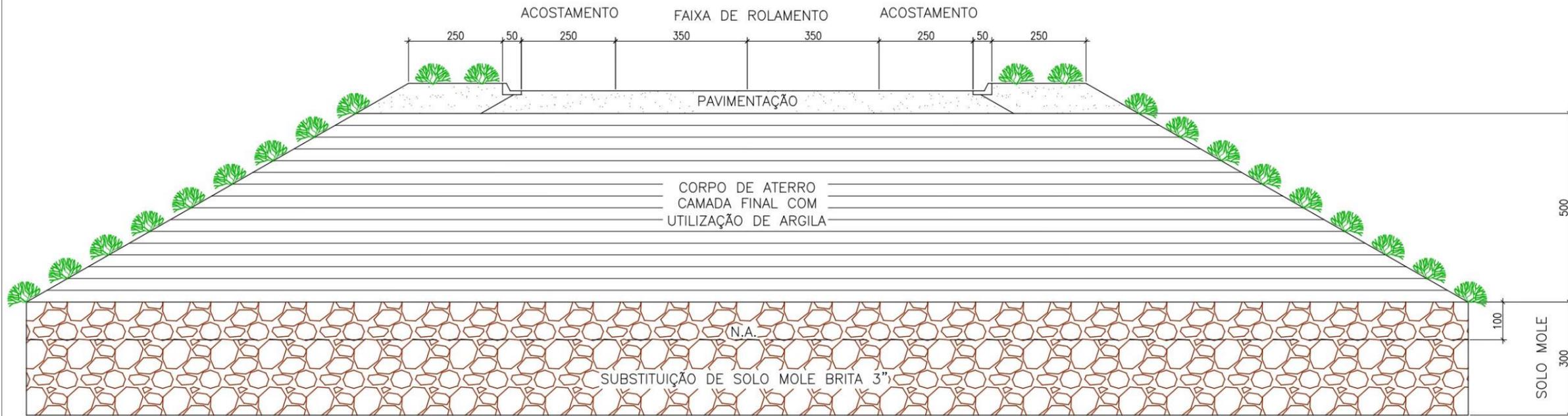
WEIDEMA, B. P. **Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 3, n. 5, p. 259-265, 1998.

5 Softwares para realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos seus produtos. **Enciclo**. Disponível em: <<https://www.enciclo.com.br/blog/5-softwares-para-realizar-analise-de-ciclo-de-vida-acv-dos-seus-produtos/>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

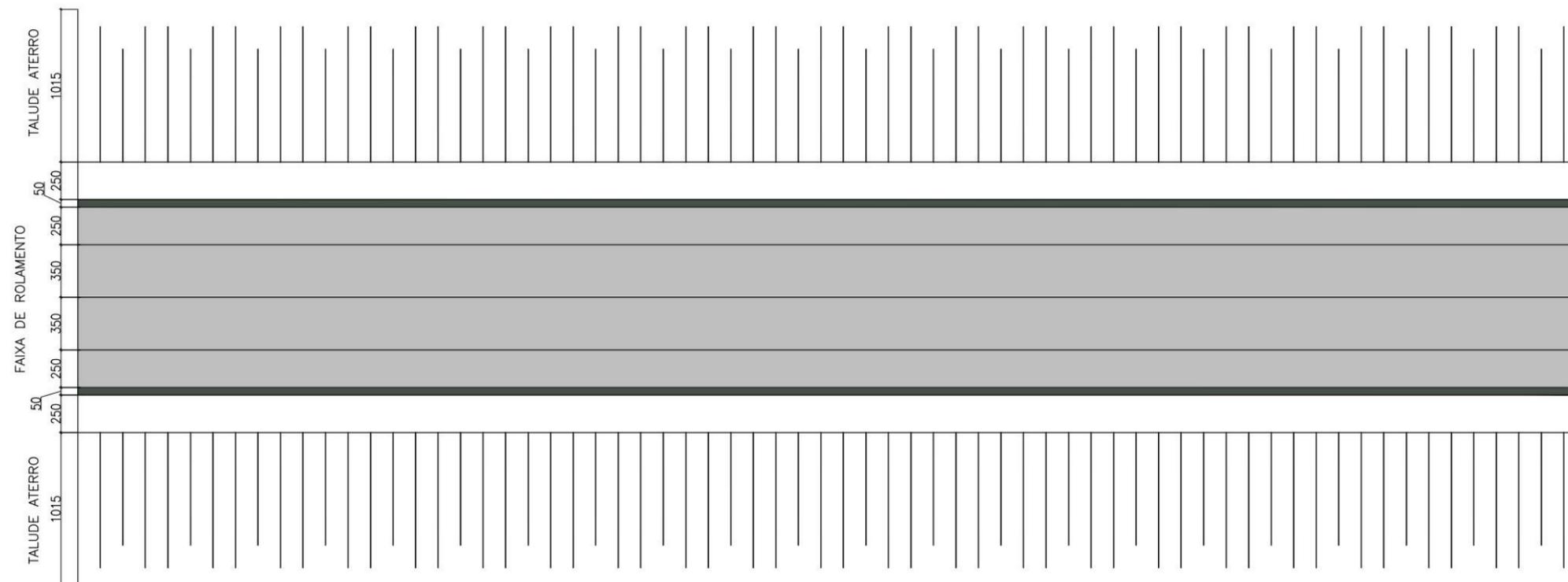
7 APÊNDICES

7.1 APÊNDICE A - Aterro convencional

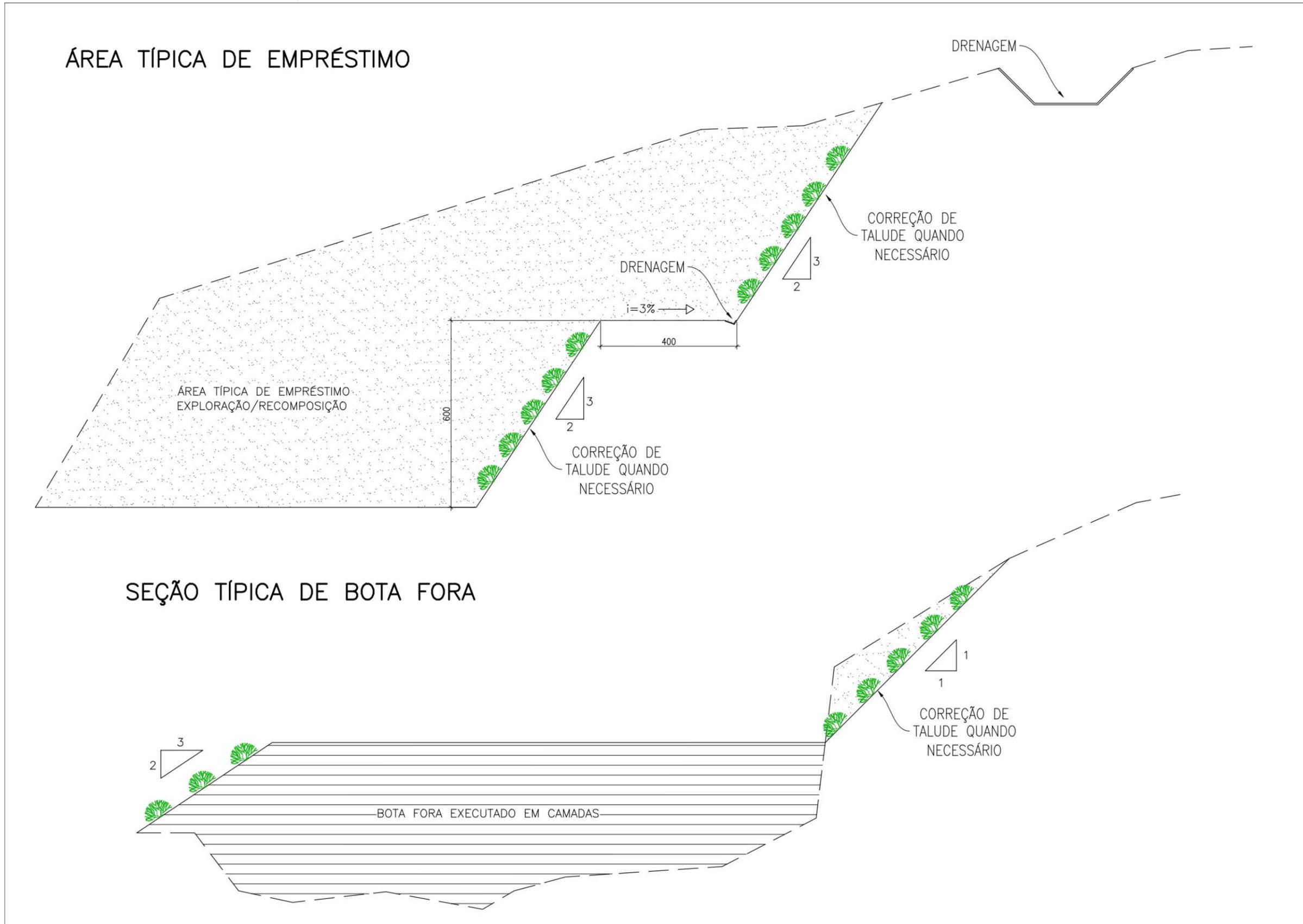
ATERRO CONVENCIONAL EM CORTE



ATERRO CONVENCIONAL EM PLANTA

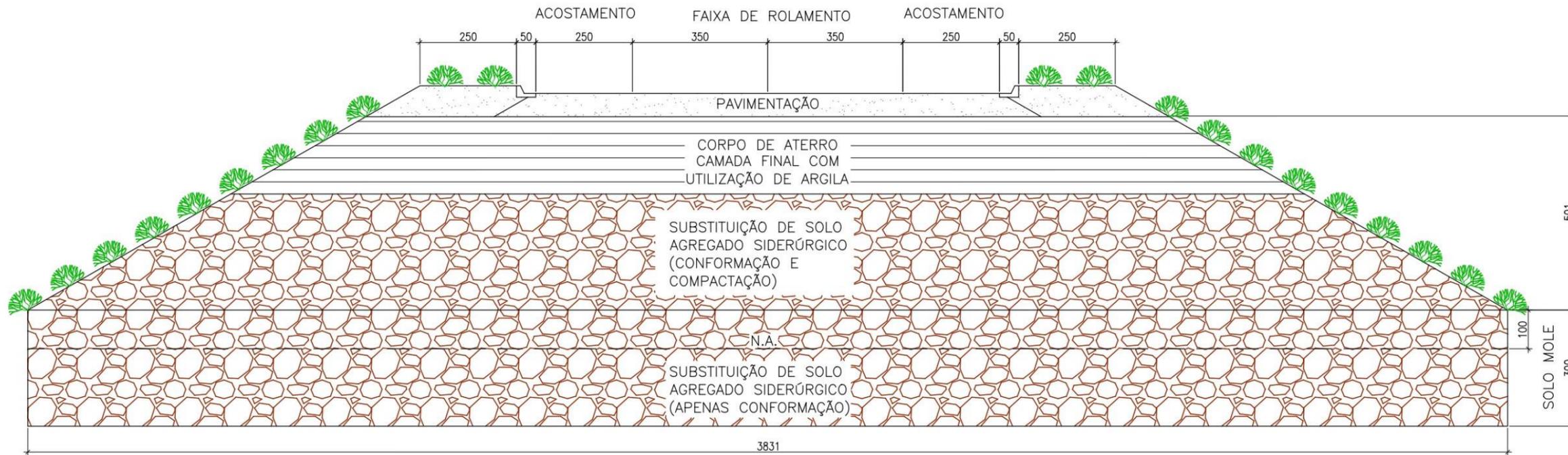


7.2 APÊNDICE B - Área de conformação do bota-fora

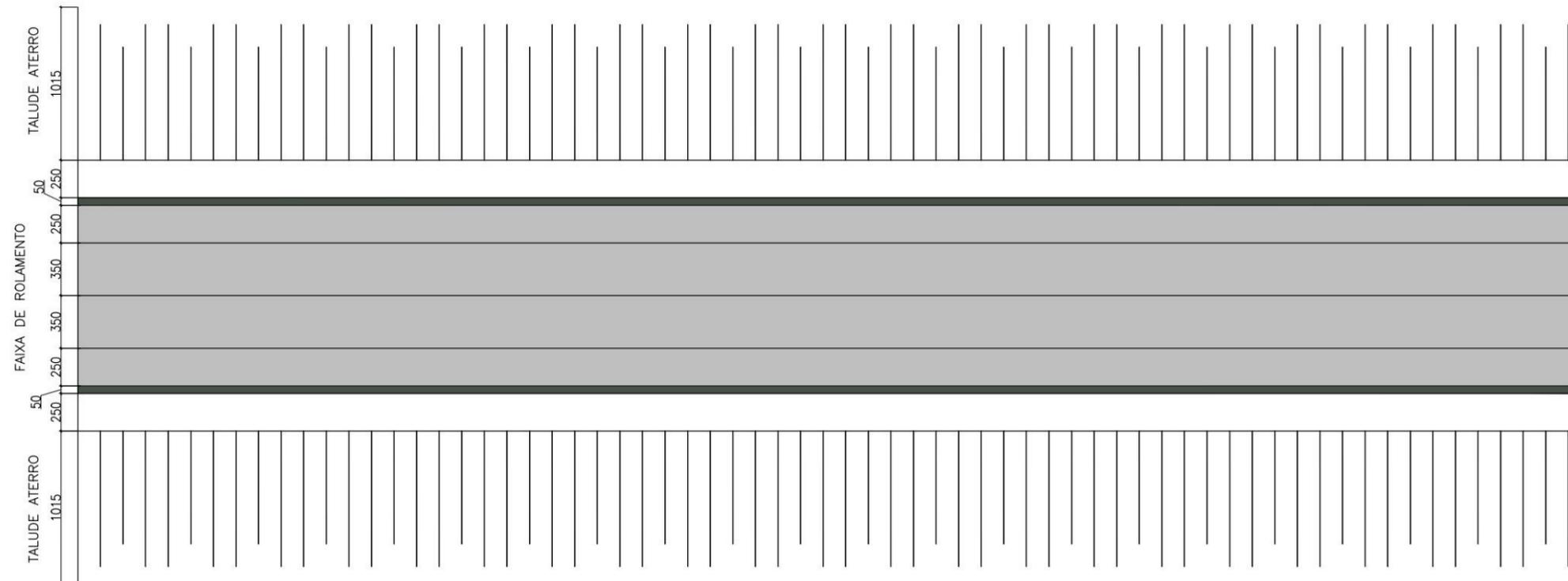


7.3 APÊNDICE C - Aterro com agregado siderúrgico

ATERRO COM AGREGADO SIDERÚRGICO EM CORTE



ATERRO COM AGREGADO SIDERÚRGICO EM PLANTA



8 ANEXOS

Anexo A: Relatório analítico argila



Relatório Analítico 63438/2022.0.A

Proposta Comercial: PC2942/2022.1



Identificação do Cliente	
Cliente: ArcelorMittal Tubarão	CNPJ/CPF: 17.469.701/0104-82
Contato: Rubiana Taquete Brandão	Telefone: (27) 3348-3706
Endereço: Avenida Brigadeiro Eduardo Gomes, Número: 930 - Espírito Santo - Brazil	
Informações da Amostra - Nº: 63438-1/2022.0 - Resíduo Massa Bruta - Solo	
Tipo de Amostra: Resíduo Massa Bruta	ID Amostra: 446052
Critério de Conformidade: ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - (Massa Bruta) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo F (Lixiviado)	
Data Coleta: 28/09/2022 13:00	Data de Publicação: 07/12/2022 16:31
Data de Recebimento: 25/10/2022 14:39	
Tipo de Coleta: Simples	Local da Coleta: Resíduo Massa Bruta - Solo
Condições Climáticas no Momento da Coleta: Não Informado	Condições Climáticas nas Últimas 48 horas: Não Informado
Observações: -	

Resultados Analíticos						
Compostos orgânicos semi-voláteis						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Endrin	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,0006 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	23,81%
Heptacloro Epóxido + Heptacloro	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	NA
Hexaclorobenzeno	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	20,94%
Lindano (gama-BHC ou gama-HCH)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	21,57%
Metoxicloro	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,02 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	13,19%
Toxafeno	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	18,73%
Clordano (cis + trans)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,0002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	17,41%
Aldrin + Dieldrin	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	24,02%
DDTs (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	26,10%

Constituintes inorgânicos não metálicos						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Cianeto Total	< 0,002 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,07 mg/L	0,002 mg/L	POP-FQ-052 Anexo V	6,20%
Cloreto Total	4,00 mg/L	25/10/2022	Máx. 250 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo VI	14,00%
Fluoreto Total	< 0,40 mg/L	25/10/2022	Máx. 1,5 mg/L	0,40 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XVII	18,25%
Nitrato	0,690 mg/L (como N)	25/10/2022	Máx. 10,0 mg/L	0,230 mg/L (como N)	ABNT NBR 10006:2004/POP-FQ-052 Anexo XX	7,70%
Sulfato Total	< 2,00 mg/L	25/10/2022	Máx. 250 mg/L	2,00 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXVII	9,00%

Constituintes orgânicos agregados						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Surfactantes	0,13 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,5 mg/L	0,10 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXIX	8,50%
Fenóis Totais	< 0,003 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,003 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-106	29,33%

Metais						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Alumínio Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,2 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	5,13%
Arsênio Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	23,24%
Bário Total	0,073 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,7 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,27%
Cádmio Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	8,92%
Chumbo Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%
Cobre Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 2,0 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	4,59%
Cromo Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,82%
Zinco Total	0,039 mg/L	25/10/2022	Máx. 5,0 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	9,27%
Ferro Total	0,045 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,3 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	10,91%
Manganês Total	0,070 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,1 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Mercurio Total	< 0,00010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	14,19%

Prata Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%
Selênio Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Sódio Total	1,10 mg/L	25/10/2022	Máx. 200 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	3,82%

Provedores Externos

Mérieux Nutrisciences - CRL 0172

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
2,4,5-T	< 0,049 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,049 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA
2,4,5-TP	< 0,049 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,049 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA
2,4-D	< 0,049 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,049 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA

8.1 Anexo B: Relatório analítico brita



Relatório Analítico 63440/2022.0.A

Proposta Comercial: PC2942/2022.1



Identificação do Cliente

Cliente: ArcelorMittal Tubarão	CNPJ/CPF: 17.469.701/0104-82
Contato: Rubiana Taquete Brandão	Telefone: (27) 3348-3706
Endereço: Avenida Brigadeiro Eduardo Gomes, Número: 930 - Espírito Santo - Brazil	

Informações da Amostra - Nº: 63440-1/2022.0 - Resíduo Massa Bruta - Brita

Tipo de Amostra: Resíduo Massa Bruta	ID Amostra: 446049
Critério de Conformidade: ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - (Massa Bruta) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo F (Lixiviado)	
Data Coleta: 28/09/2022 12:00	Data de Publicação: 07/12/2022 16:45
Data de Recebimento: 25/10/2022 14:39	
Tipo de Coleta: Simples	Local da Coleta: Resíduo Massa Bruta - Brita
Condições Climáticas no Momento da Coleta: Não Informado	Condições Climáticas nas Últimas 48 horas: Não Informado
Observações: -	

Resultados Analíticos

Compostos orgânicos semi-voláteis

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Endrin	< 0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,0006 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	23,81%
Heptacloro Epóxido + Heptacloro	< 0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	NA
Hexaclorobenzeno	< 0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	20,94%

Lindano (gama-BHC ou gama-HCH)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	21,57%
Metoxicloro	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,02 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	13,19%
Toxafeno	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	18,73%
Clordano (cis + trans)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,0002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	17,41%
Aldrin + Dieldrin	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	24,02%
DDTs (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	<0,00001 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	26,10%

Constituintes inorgânicos não metálicos

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Cianeto Total	< 0,002 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,07 mg/L	0,002 mg/L	POP-FQ-052 Anexo V	6,20%
Cloreto Total	2,00 mg/L	25/10/2022	Máx. 250 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo VI	14,00%
Fluoreto Total	< 0,40 mg/L	25/10/2022	Máx. 1,5 mg/L	0,40 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XVII	18,25%
Nitrato	0,370 mg/L (como N)	25/10/2022	Máx. 10,0 mg/L	0,230 mg/L (como N)	ABNT NBR 10006:2004/POP-FQ-052 Anexo XX	7,70%
Sulfato Total	5,00 mg/L	25/10/2022	Máx. 250 mg/L	2,00 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXVII	9,00%

Constituintes orgânicos agregados

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Surfactantes	< 0,10 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,5 mg/L	0,10 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXIX	8,50%
Fenóis Totais	< 0,003 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,003 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-106	29,33%

Metais

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Alumínio Total	0,177 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,2 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	5,13%
Arsênio Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	23,24%
Bário Total	0,026 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,7 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,27%
Cádmio Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	8,92%
Chumbo Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%

Cobre Total	0,0011 mg/L	25/10/2022	Máx. 2,0 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	4,59%
Cromo Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,82%
Zinco Total	0,015 mg/L	25/10/2022	Máx. 5,0 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	9,27%
Ferro Total	0,041 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,3 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	10,91%
Manganês Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,1 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Mercurio Total	< 0,00010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	14,19%
Prata Total	< 0,0010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%
Selênio Total	< 0,010 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Sódio Total	4,46 mg/L	25/10/2022	Máx. 200 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	3,82%

Provedores Externos

Mérieux Nutrisciences - CRL 0172

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
2,4,5-T	< 0,050 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,05 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA
2,4,5-TP	< 0,050 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,05 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA
2,4-D	< 0,050 mg/L	25/10/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,05 mg/L	EPA 8270E-1, 3510C	NA

8.2 Anexo C: Relatório analítico agregado siderúrgico



Relatório Analítico 56544/2022.0.A

Proposta Comercial: PC2704/2022.2



Identificação do Cliente

Cliente: ArcelorMittal Tubarão	CNPJ/CPF: 17.469.701/0104-82
Contato: Eduardo Shiramata	Telefone: (27) 3348 - 2095
Endereço: Avenida Brigadeiro Eduardo Gomes, Número: 930 - Espírito Santo - Brazil	

Informações da Amostra - Nº: 56544-1/2022.0 - REVSOL (100% AGREGADO SIDERURGIO LD)

Tipo de Amostra: Resíduo Massa Bruta	ID Amostra: 436157
Critério de Conformidade: ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo F (Lixiviado) , ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - (Massa Bruta)	
Data Coleta: 27/09/2022 11:21	Data de Publicação: 08/11/2022 14:33
Data de Recebimento: 27/09/2022 13:30	
Tipo de Coleta: Composta	Local da Coleta: Canteiro 8
Condições Climáticas no Momento da Coleta: Sol	Condições Climáticas nas Últimas 48 horas: Nublado
Temperatura Ambiente (°C): 28,0	Temperatura da Amostra (°C): 34,0
Observações: -	Latitude: -20,22824

Longitude: -40,24535



Compostos orgânicos semi-voláteis

Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
2,4,5-T	<0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-004	15,21%
2,4,5-TP	<0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-004	19,16%
2,4-D	<0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,03 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-004	15,67%
Endrin	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,0006 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	23,81%
Heptacloro Epóxido + Heptacloro	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	NA
Hexaclorobenzeno	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	20,94%
Lindano (gama-BHC ou gama-HCH)	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	21,57%
Metoxicloro	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,02 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	13,19%

Compostos orgânicos semi-voláteis						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Toxafeno	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	18,73%
Clordano (cis + trans)	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,0002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	17,41%
Aldrin + Dieldrin	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,00003 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	24,02%
DDTs (p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD)	<0,00001 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,002 mg/L	0,00001 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-CR-001	26,10%

Constituintes inorgânicos não metálicos						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Cianeto Total	0,53 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,07 mg/L	0,002 mg/L	POP-FQ-052 Anexo V	6,20%
Cloreto Total	40,0 mg/L	27/09/2022	Máx. 250 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo VI	14,00%
Fluoreto Total	0,64 mg/L	27/09/2022	Máx. 1,5 mg/L	0,40 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XVII	18,25%
Nitrato	0,500 mg/L (como N)	27/09/2022	Máx. 10,0 mg/L	0,230 mg/L (como N)	ABNT NBR 10006:2004/POP-FQ-052 Anexo XX	7,70%
Sulfato Total	< 2,00 mg/L	27/09/2022	Máx. 250 mg/L	2,00 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXVII	9,00%

Constituintes orgânicos agregados						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Surfactantes	< 0,10 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,5 mg/L	0,10 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-052 Anexo XXIX	8,50%
Fenóis Totais	0,045 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,003 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-106	29,33%

Metais						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Alumínio Total	0,197 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,2 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	5,13%
Arsênio Total	< 0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	23,24%
Bário Total	0,752 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,7 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,27%

Metais						
Análise	Resultado	Data de Início	ABNT NBR 10.004, de 30 de Novembro de 2004 - Resíduos Sólidos - Anexo G (Solubilizado)	LQ	Referência	Incerteza
Cádmio Total	< 0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,005 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	8,92%
Chumbo Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%
Cobre Total	< 0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 2,0 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	4,59%
Cromo Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	7,82%
Zinco Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 5,0 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	9,27%
Ferro Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,3 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	10,91%
Manganês Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,1 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Mercúrio Total	< 0,00010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,001 mg/L	0,00010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	14,19%
Prata Total	< 0,0010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,05 mg/L	0,0010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	15,00%
Selênio Total	< 0,010 mg/L	27/09/2022	Máx. 0,01 mg/L	0,010 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	6,91%
Sódio Total	15,2 mg/L	27/09/2022	Máx. 200 mg/L	0,100 mg/L	ABNT NBR, 10006:2004 / POP-FQ-081	3,82%