



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARINA LESSA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE CONCRETO ASFÁLTICO
COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS**

Recife
2025

CARINA LESSA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE CONCRETO ASFÁLTICO
COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia civil.

Área de concentração: Construção civil.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Coorientador: Prof. Dr. Lyneker Souza de Moura

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Carina Lessa.

Avaliação do ciclo de vida de sistemas de concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais têxteis / Carina Lessa Silva. - Recife, 2025.

105 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Coorientação: Lyneker Souza de Moura.

Inclui referências e apêndices.

1. Economia circular; 2. Material alternativo; 3. Mistura asfáltica; 4. Cinzas de algaroba; 5. Lodo têxtil. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Moura, Lyneker Souza de. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CARINA LESSA SILVA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS DE CONCRETO ASFÁLTICO
COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia civil.

Área de concentração: Construção civil.

Aprovada em: 15/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Kamilla Vasconcelos Savasini (Examinadora Externa)
Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Maristela Gomes da Silva (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

Profa. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho a José Fernando (Zé), que nunca mediu esforços para me apoiar em todas as esferas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em todas as suas formas, por me guiar e colocar pessoas tão especiais no meu caminho. À minha família, sanguínea e a que cativei ao longo da vida, por todo apoio e incentivo incondicionais, em especial, minha madrinha, Rejane, e seus pais, Zé (José Fernando) e Ni (Antonieta).

A Vitória, por todo apoio durante a construção deste trabalho, no qual depositou confiança desde o princípio e, por meio da sua escuta ativa, me motivou a concluí-lo.

A Manuel, por não me deixar esquecer que há vida para além do acadêmico/profissional.

A todas minhas amigas e amigos, com quem pude fazer trocas enriquecedoras e guardar boas memórias, em especial, Maria, por todas as conversas, cafés, momentos de qualidade e contribuições para este trabalho.

Ao meu orientador, professor Arnaldo, pela orientação e contribuições ao longo da pesquisa.

Ao meu coorientador, professor Lyneker, pela parceria durante toda minha trajetória de pesquisa, desbravando os resíduos têxteis e suas aplicações

Às professoras Kamilla, Maristela e Ana Cecilia, por aceitarem o convite para compor a banca de avaliação e pelas ricas contribuições a este trabalho.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco, pela concessão das bolsas.

A todos que contribuíram para a construção deste trabalho.

“O uso racional, adequado, tecnicamente aconselhável e economicamente viável, só é alcançado com o conhecimento tão perfeito quanto possível das propriedades dos materiais.” (PETRUCCI, 1982).

RESUMO

No contexto do Agreste de Pernambuco, a produção têxtil é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos sólidos, principalmente o lodo têxtil e as cinzas de biomassa. A incorporação desses resíduos no concreto asfáltico já foi realizada e obteve desempenho mecânico satisfatório para até 3% de incorporação de lodo têxtil (3LT) e até 4% de cinzas de algaroba (4CA), porém não foram mensurados os impactos relacionados ao ciclo de vida de tais materiais alternativos. Dessa forma, é objetivo deste trabalho realizar a ACV para sistemas de 3LT e 4CA. Foram considerados três cenários de transporte de resíduo: 10 km (C1), 30 km (C2) e 60 km (C3). A fronteira do sistema englobou desde a extração das matérias-primas até a produção da mistura asfáltica, em uma abordagem *cradle-to-gate*. Para a construção do inventário, foram considerados, principalmente, dados da base Ecoinvent, a estruturação da ACV foi realizada no OpenLCA e o método de avaliação foi o ReCiPe 2016 *midpoint* (H). A qualidade dos dados foi avaliada pelo Ecoinvent Data Quality System. Na Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), o cenário C1 e a mistura 4CA apresentaram o melhor desempenho para todas as categorias de impacto avaliadas, enquanto a mistura 3LT impactou negativamente metade delas. De forma geral, três aspectos guiaram os resultados observados: o elevado consumo energético no pré-tratamento do lodo têxtil; a substituição dos agregados naturais pelas cinzas de algaroba, nas categorias com maior contribuição da produção do agregado natural; a predominância de contribuição dos processos produção da mistura e do ligante asfáltico para os impactos avaliados. Portanto, por meio da ACV, considerando a fronteira e as limitações do estudo, não foram observados benefícios ambientais da incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba em concreto asfáltico, nas condições de dosagem que guiaram esse estudo.

Palavras-chave: economia circular; material alternativo; mistura asfáltica; cinzas de algaroba; lodo têxtil.

ABSTRACT

In the context of the Agreste region of Pernambuco, Brazil, textile production is responsible for generating large volumes of solid waste, primarily textile sludge and biomass ash. The incorporation of these residues into asphalt concrete has already been conducted, showing satisfactory mechanical performance for up to 3% textile sludge (3LT) and up to 4% mesquite biomass ash (4CA). However, the life cycle impacts of these alternative materials had not been assessed. Therefore, the objective of this study was to perform a Life Cycle Assessment (LCA) of the 3LT and 4CA systems. Three waste transportation scenarios were considered: 10 km (C1), 30 km (C2), and 60 km (C3). The system boundary covered the processes from raw material extraction to asphalt mixture production, following a cradle-to-gate approach. Inventory data were primarily sourced from the Ecoinvent database; the LCA modeling was performed in OpenLCA, and the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method was used for impact assessment. Data quality was evaluated using the Ecoinvent Data Quality System. In the Life Cycle Impact Assessment (LCIA), scenario C1 and the 4CA mixture showed the best performance across all evaluated impact categories, while the 3LT mixture negatively affected half of them. Overall, three aspects guided the observed results: the high energy consumption required for textile sludge pre-treatment; the replacement of natural aggregates with mesquite ash in impact categories where aggregate production had a significant contribution; and the predominant contribution of asphalt mixture and binder production processes to the assessed impacts. Therefore, through LCA, considering the system boundaries and the limitations of this study, no environmental benefits were observed from incorporating textile sludge or mesquite ash into asphalt concrete under the dosage conditions evaluated.

Keywords: circular economy; alternative material; asphalt mixture; mesquite ash; textile sludge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxo do tratamento físico-químico do efluente têxtil	25
Figura 2: Lodo têxtil no leito de secagem da lavanderia industrial	26
Figura 3: Ciclo ideal para o mercado de materiais reciclados	31
Figura 4: Possibilidades de recirculação de recursos	32
Figura 5: Granulometria a laser do lodo têxtil.....	36
Figura 6: Resistência à tração de concretos asfálticos com lodo têxtil.....	37
Figura 7: Estabilidade Marshall de concretos asfálticos com lodo têxtil	37
Figura 8: Granulometria a laser do lodo têxtil.....	38
Figura 9: Resistência à tração de concretos asfálticos com cinzas de algaroba.....	38
Figura 10: Estabilidade Marshall de concretos asfálticos com cinzas de algaroba ...	39
Figura 11: Ciclo de vida de um produto genérico	39
Figura 12: Fases da avaliação do ciclo de vida.....	40
Figura 13: Abordagens utilizadas para definição de fronteiras de ACV	43
Figura 14: Fronteira dos sistemas avaliados.....	51
Figura 15: Avaliação da categoria de impacto Consumo de água	60
Figura 16: Contribuição dos processos na categoria de impacto Consumo de água	61
Figura 17: Avaliação da categoria de impacto Ecotoxicidade de água doce.....	61
Figura 18: Contribuição dos processos na categoria de impacto Ecotoxicidade de água doce.....	62
Figura 19: Avaliação da categoria de impacto Ecotoxicidade marinha	62
Figura 20: Contribuição dos processos na categoria de impacto Ecotoxicidade marinha	63
Figura 21: Avaliação da categoria de impacto Radiação ionizante	63
Figura 22: Contribuição dos processos na categoria de impacto Radiação ionizante	64
Figura 23: Avaliação da categoria de impacto Uso do solo.....	64
Figura 24: Contribuição dos processos na categoria de impacto Uso do solo	65
Figura 25: Avaliação da categoria de impacto Acidificação terrestre	66
Figura 26: Contribuição dos processos na categoria de impacto Acidificação terrestre	67
Figura 27: Avaliação da categoria de impacto Depleção de ozônio estratosférico....	67

Figura 28: Contribuição dos processos na categoria de impacto Depleção de ozônio estratosférico.....	68
Figura 29: Avaliação da categoria de impacto Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	68
Figura 30: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	69
Figura 31: Avaliação da categoria de impacto Formação de ozônio, saúde humana.....	69
Figura 32: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de ozônio, saúde humana.....	70
Figura 33: Avaliação da categoria de impacto Aquecimento global	71
Figura 34: Contribuição dos processos na categoria de impacto Aquecimento global	71
Figura 35: Avaliação da categoria de impacto Ecotoxicidade terrestre	72
Figura 36: Contribuição dos processos na categoria de impacto Ecotoxicidade terrestre	72
Figura 37: Avaliação da categoria de impacto Escassez de recursos fósseis	73
Figura 38: Contribuição dos processos na categoria de impacto Escassez de recursos fósseis	73
Figura 39: Avaliação da categoria de impacto Escassez de recursos minerais	74
Figura 40: Contribuição dos processos na categoria de impacto Escassez de recursos minerais	74
Figura 41: Avaliação da categoria de impacto Eutrofização de água doce	75
Figura 42: Contribuição dos processos na categoria de impacto Eutrofização de água doce.....	75
Figura 43: Avaliação da categoria de impacto Eutrofização marinha.....	76
Figura 44: Contribuição dos processos na categoria de impacto Eutrofização marinha	76
Figura 45: Avaliação da categoria de impacto Formação de material particulado fino	77
Figura 46: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de material particulado fino	77
Figura 47: Avaliação da categoria de impacto Toxicidade cancerígena para humanos	78

Figura 48: Contribuição dos processos na categoria de impacto Toxicidade cancerígena para humanos.....	78
Figura 49: Avaliação da categoria de impacto Toxicidade não cancerígena para humanos.....	79
Figura 50: Contribuição dos processos na categoria de impacto Toxicidade não cancerígena para humanos.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição inorgânica de diferentes amostras de lodo têxtil.....	26
Tabela 2: Massa específica e pH de diferentes amostras de lodo têxtil.....	27
Tabela 3: Composição inorgânica de diferentes amostras de cinzas de algaroba....	29
Tabela 4: Propriedades físicas de amostra de cinzas de algaroba	29
Tabela 5: Composição das misturas avaliadas	50
Tabela 6: Cenários considerados na avaliação.....	50
Tabela 7: Características dos equipamentos considerados no processamento do lodo têxtil	52
Tabela 8: Consumo energético no processamento do lodo têxtil	52
Tabela 9: Características dos equipamentos considerados no processamento do lodo têxtil	53
Tabela 10: Informações relacionadas ao transporte de materiais	54
Tabela 11: Dados considerados no inventário do ciclo de vida.....	54
Tabela 12: Indicadores e pontuações de qualidade dos dados.....	56
Tabela 13: Visão geral da AICV	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACCV	Avaliação do Custo do Ciclo de Vida
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
APL	Arranjo Produtivo Local
ASG	Ambiental, Social e Governança
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRH	Agência Estadual do Meio Ambiente do estado de Pernambuco
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
DALY	Disability Adjusted Life Years
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
FRX	Fluorescência de Raios-X
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	Global Warming Potential
HTP	Human Toxicity Potential
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IFRS	International Financial Reporting Standards
ISO	International Organization for Standardization
ISSB	International Sustainability Standards Board
MEI	Microempreendedor Individual
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
pH	potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TETP	Terrestrial Ecotoxicity Potential
UE	União Europeia
VBP	Valor Bruto da Produção

LISTA DE SÍMBOLOS

1,4-DCB	1,4-diclorobenzeno
3LT	concreto asfáltico com 3% de Lodo Têxtil
4CA	concreto asfáltico com 4% de Cinzas de Algaroba
a crop	amount of land converted to crops (do inglês, quantidade de terra convertida em plantações)
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2
C3	Cenário 3
CaO	óxido de cálcio
CFC-11	tricloromonofluormetano
CO ₂	dióxido de carbono (em temperatura ambiente, gás carbônico)
Co-60	cobalto-60 (isótopo radioativo do cobalto)
Cr ₂ O ₃	óxido de cromo
Cu	cobre
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro
K ₂ O	óxido de potássio
kBq	kilobecquerel
MgO	óxido de magnésio
MnO	óxido de manganês
Na ₂ O	óxido de sódio
NO _x	nitrogen oxides (do inglês, óxidos de nitrogênio)
P	fósforo
P ₂ O ₅	pentóxido de difósforo
PM2.5	partículas inaláveis finas
REF	concreto asfáltico sem incorporação de resíduos
SiO ₂	dióxido de silício (sílica)
SO ₂	dióxido de enxofre
SO ₃	trióxido de enxofre (óxido sulfúrico)
TiO ₂	dióxido de titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS	21
2.1.1	Setor têxtil	21
2.1.2	Lodo têxtil	23
2.1.3	Cinzas de algaroba	28
2.2	ECONOMIA CIRCULAR	29
2.3	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	34
2.3.1	Incorporação dos resíduos têxteis no concreto asfáltico	36
2.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	39
2.4.1	Definição do objetivo e escopo	41
2.4.2	Análise do inventário	44
2.4.3	Avaliação dos impactos do ciclo de vida	44
2.4.4	Interpretação dos resultados	45
2.4.5	Abordagem iterativa	45
2.4.6	ACV de misturas asfálticas	46
2.5	SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3	METODOLOGIA	49
3.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO	49
3.1.1	Sistemas de produto	49
3.1.2	Fronteira do sistema	51
3.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	51
3.2.1	Processamento do lodo têxtil	52
3.2.2	Processamento das cinzas de algaroba	53
3.2.3	Produção do concreto asfáltico	53
3.2.4	Transporte de materiais	53
3.2.5	Dados considerados para o inventário	54

3.2.6	Análise de qualidade dos dados	55
3.3	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	CONSUMO ENERGÉTICO NO PROCESSAMENTO DO LODO TÊXTIL 60	
4.2	SUBSTITUIÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS POR RESÍDUOS TÊXTEIS 66	
4.3	PREDOMINÂNCIA DE CONTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS FÓSSEIS .	70
4.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICE A – GLOSSÁRIO¹.....	94
	APÊNDICE B – FLUXOS DE ENTRADA	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Nos municípios de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, principais membros do Arranjo Produtivo Local (APL) de Confecções do Agreste de Pernambuco, a principal atividade industrial é a transformação têxtil. Dentre os processos realizados, destaca-se o beneficiamento do jeans, realizado nas lavanderias industriais, conferindo às peças as características desejadas. Nessa atividade industrial, são ocasionados impactos ambientais diversos, como: geração de efluentes industriais; geração de resíduos sólidos, perigosos e não perigosos; emissões atmosféricas de gases e fuligem; consumo de água; e contribuição para o desmatamento.

Os principais resíduos sólidos gerados são o lodo têxtil, advindo do tratamento do efluente das lavanderias, e as cinzas de biomassas vegetais, majoritariamente algaroba, proveniente do aquecimento das caldeiras. O lodo têxtil é um resíduo de classe IIA, não perigoso e não inerte; já as cinzas de algaroba se caracterizam como um resíduo de classe IIB, não perigoso e inerte. No APL de Confecções do Agreste, é estimado que sejam geradas, anualmente, cerca de 1200 t de lodo têxtil e 3120 t de cinzas de algaroba.

O modelo de produção atual é ineficaz no enfrentamento de desafios como: mudanças climáticas; escassez hídrica; perda da biodiversidade; escassez de recursos naturais; e desigualdades sociais. Nesse sentido, o modelo econômico circular propõe a associação do crescimento econômico à preservação e otimização do uso de recursos. Além da perspectiva socioambiental, a economia circular contribui para a resiliência dos sistemas econômicos, pois prolonga a permanência dos materiais no ciclo produtivo.

A construção civil, por seu potencial poluidor e elevado consumo de recursos naturais, tem buscado alternativas para reduzir e mitigar os impactos ambientais que gera. Uma abordagem comumente utilizada é a incorporação de resíduos em materiais de construção, buscando a redução de destinações a aterros sanitários. Os resíduos industriais têxteis já foram incorporados em diversos materiais de construção, nomeadamente o concreto asfáltico, no qual substituíram parcialmente os agregados naturais, atuando como fíleres.

As misturas asfálticas alternativas, com incorporação de resíduos têxteis, obtiveram propriedades mecânicas satisfatórias, semelhantes às da mistura convencional, sem incorporação de resíduos. De modo a assegurar a classificação como concreto asfáltico de faixa “C”, semelhante ao material convencional, os teores de incorporação máximo dos resíduos foram de 3%, para o lodo têxtil, e 4%, para as cinzas de algaroba. Apesar de proporcionar uma alternativa de circularidade aos resíduos têxteis, não são claros os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida desses novos materiais.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que realiza estimativas dos fluxos de materiais e energia envolvidos no ciclo de vida de determinado produto, a fim de compreender os impactos relacionados a ele. A utilização da ACV para mensurar o desempenho ambiental dos sistemas de concreto asfáltico com incorporação dos resíduos industriais têxteis gerados no APL de Confeções do Agreste pode contribuir para a identificação de processos críticos e oportunidades de melhoria, auxiliando na tomada de decisão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, por meio de uma abordagem comparativa, os impactos do ciclo de vida de sistemas de concreto asfáltico com incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba, gerados no Arranjo Produtivo Local de Confeções do Agreste de Pernambuco.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Identificar os principais fluxos de materiais e energia ao longo do ciclo de vida dos sistemas de concreto asfáltico com incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba.

- Avaliar a viabilidade ambiental da incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba em concreto asfáltico no contexto do Arranjo Produtivo Local de Confeções do Agreste de Pernambuco.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: É apresentada uma contextualização do tema, problemáticas relacionadas a ele e justificativas para a pesquisa, também objetivos, geral e específicos, a serem alcançados.

Capítulo 2: São abrangidos, ao longo das subseções da fundamentação teórica, os principais aspectos relacionados ao tema de pesquisa. Na seção 2.1, são descritos os cenários, global e local, do setor têxtil, sua relevância para a economia e principais impactos ambientais relacionados, também as propriedades do lodo têxtil e das cinzas de algaroba, principais resíduos gerados no APL de Confeções do Agreste de Pernambuco. Na seção 2.2, são contemplados os conceitos envolvidos à economia circular. Na seção 2.3, são apresentados estudos que realizaram a incorporação de resíduos diversos em misturas asfálticas, também do lodo têxtil e cinzas de biomassa em materiais de construção diversos. Na seção 2.4, é definida a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida, descrevendo as fases do processo e seus produtos, e apresentados estudos de Avaliação do Ciclo de vida de misturas asfálticas. Por fim, na seção 2.5, é apresentada uma síntese da fundamentação teórica.

Capítulo 3: São descritos os procedimentos metodológicos utilizados para realizar a ACV, contemplando: Definição do objetivo e escopo (seção 3.1); Inventário do ciclo de vida (seção 3.2); e Avaliação dos impactos do ciclo de vida (seção 3.2.6).

Capítulo 4: São apresentados os resultados obtidos para os procedimentos realizados, contemplando a AICV e explicitadas as discussões a partir da comparação dos resultados dos dois sistemas alternativos.

Capítulo 5: São descritas as considerações finais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS INDUSTRIAIS TÊXTEIS

2.1.1 Setor têxtil

Os setores de têxteis e de confecções constituem a sétima indústria mais comercializada no mundo, tendo o comércio global de vestuário atingido US\$ 414 bilhões, em 2019, sendo a demanda liderada pelo mercado de países desenvolvidos. A UE, os Estados Unidos, o Japão e o Reino Unido representam cerca de 75% das importações (FERNÁNDEZ-STARK; BAMBER; COUTO, 2022).

Esses setores são globalizados e têm se realocado consistentemente no mundo ao longo das últimas décadas em busca de trabalhadores de baixo custo. Nesse sentido, a produção atual tem predominância geográfica no continente asiático, sendo liderado pela China, Bangladesh e Vietnã, que representam mais de 50% das exportações (FERNÁNDEZ-STARK; BAMBER; COUTO, 2022; RUIZ, 2022). A China se destaca como maior produtor e exportador mundial, tendo capturado quase 34% da participação no mercado global em 2021 (RUIZ, 2022).

Na tentativa de competir com o mercado asiático, é incentivado que os países da América Latina tomem medidas como: foco na produção de têxteis sustentáveis; atualização dos processos produtivos; e aumento a sustentabilidade em toda a cadeia produtiva (FERNÁNDEZ-STARK; BAMBER; COUTO, 2022). Segundo Costa *et al.* (2020), é necessário que as empresas compreendam que as produções ecologicamente responsáveis envolvem não apenas a consciência ambiental, mas também a lucratividade. Para os autores, a adoção de práticas sustentáveis aumenta a fidelidade à marca e melhora sua reputação no mercado.

Na UE, em 2018, a indústria têxtil empregou cerca de 1,6 milhão de pessoas, o que representa 2% do valor agregado do setor de manufatura da UE, porém o impacto ambiental do setor representou cerca de 4 a 6% da pegada ambiental em diversas categorias analisadas (KÖHLER *et al.*, 2021).

São alarmantes os impactos ambientais da produção têxtil: 20% da poluição global de água limpa, por meio dos processos de tingimento e acabamento de produtos; liberação de cerca de 700 mil microfibras de plástico, que podem acabar na cadeia alimentar, em apenas uma carga de efluente da lavagem de peças

fabricadas em poliéster; e o acúmulo de 500 mil de toneladas de microplásticos no fundo dos oceanos por ano, apenas na lavagem de peças sintéticas (GUILLOT, 2024). Essa poluição causa impactos negativos na saúde da população e nos ecossistemas onde as fábricas estão instaladas.

No Brasil, a cadeia têxtil e de confecções possui um valor de produção de R\$ 193,2 bilhões e cerca de 24 mil unidades produtivas. Em 2022, foram gerados mais de 1 milhão de empregos e produzidas em torno de 2 milhões de toneladas de peças, cerca de US\$ 4,8 bilhões, dados que situam o país como o décimo primeiro maior exportador em todo o mundo (BEZADO, 2023).

Os estados de Santa Catarina e São Paulo representam juntos 54% da produção nacional de vestuários, sendo os maiores produtores do país. No Nordeste, o Ceará possui o maior polo produtor e, unido aos estados de Pernambuco e Rio Grande do Norte, concentrou em torno de 10% do Valor Bruto da Produção (VBP) de vestuário do Brasil e 80% da região em 2021 (MENDES JUNIOR, 2024). O estado de Pernambuco concentra a segunda maior quantidade de unidades produtoras do Nordeste, correspondendo a 4,4% do total nacional; a maior concentração na região é no Ceará, representando 5,2% (BEZADO, 2023).

Nesse mercado, um importante canal de distribuição no contexto das vendas diretas são as feiras, sendo destaques no Nordeste: a Sulanca em Caruaru; a Feira do Jeans, em Toritama; e o Moda Center, em Santa Cruz do Capibaribe (SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 2023). Esses três municípios são os principais membros do APL de Confecções do Agreste de Pernambuco.

Considerando os setores de confecções e têxtil, Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama possuíam, em 2019, 1400 estabelecimentos e geraram cerca de 12 mil empregos, representando 52% do total da região (SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 2023). Apesar do setor possuir muitas pessoas ocupadas informalmente ou registradas como microempreendedor individual (MEI), os três municípios concentram 61% dos estabelecimentos do setor no estado e representam 51%, 89% e 95% dos empregos na indústria de transformação, respectivamente em Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, (SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE, 2023).

Conforme diagnóstico realizado pela Sudene (2023), algumas das ações recomendadas no plano de ação para aglomerados como o APL de Confecções do

Agreste de Pernambuco são: o desenvolvimento de pesquisa de mercado nichado, como o de produção sustentável; a construção de um sistema de certificação para as micro e pequenas empresas envolvendo as práticas de sustentabilidade, contribuindo para o incentivo ao desenvolvimento sustentável no setor; e a modernização tecnológica dos processos produtivos.

No APL de Confecções do Agreste de Pernambuco, a principal atividade industrial de transformação têxtil é o beneficiamento do jeans, realizado nas lavanderias industriais e envolve etapas como desengomagem, alveamento, tingimento, amaciamento, entre outras. Nesses processos de transformação, são aplicados produtos químicos para modificar o tecido bruto, atribuindo a ele as características desejadas, como aparência desbotada, manchada, texturizada, entre outras. Essas atividades são responsáveis pela geração de impactos ambientais, como: geração de efluentes industriais; geração de resíduos sólidos, perigosos e não perigosos; emissões atmosféricas de gases e fuligem; consumo de água; e contribuição para o desmatamento (CPRH, 2018). Os principais resíduos sólidos não perigosos gerados são o lodo têxtil, advindo do tratamento do efluente das lavanderias, e as cinzas, da queima para aquecimento das caldeiras.

2.1.2 Lodo têxtil

Os efluentes gerados nas lavanderias possuem corantes, sólidos suspensos, óleos e graxas, pH alterado, temperaturas elevadas, além da presença significativa de matéria orgânica, metais pesados e surfactantes (CPRH, 2018). Essas características indicam a necessidade da realização de tratamento nesses efluentes antecedendo o lançamento em corpos hídricos, de modo a atender os padrões estabelecidos nas legislações vigentes.

A resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define os parâmetros e padrões que devem ser avaliados para o lançamento de efluentes (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011). É descrito no artigo 3º do documento que os efluentes só podem ser lançados em corpos receptores após a realização do tratamento adequado, atendendo às condições dispostas nesta e nas demais normas aplicáveis.

Na seção II da resolução, são definidos os parâmetros a serem avaliados nos efluentes a serem lançados, são esses: potencial hidrogeniônico (pH); temperatura;

materiais sedimentáveis; regime de lançamento; óleos e graxas; materiais flutuantes; demanda bioquímica de oxigênio (DBO); e parâmetros inorgânicos (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011). O controle inadequado dessas condições descritas pode ocasionar a poluição das águas, que é compreendida como a incorporação de substâncias ou formas de energia, de maneira direta ou indireta, que alterem a natureza do corpo d'água de modo a prejudicar os usos legítimos dele (VON SPERLING, 1996).

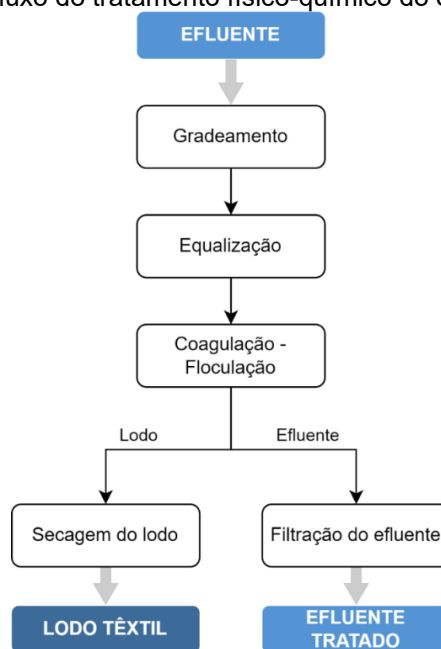
Para determinar o tratamento a ser realizado, é necessário definir alguns aspectos: objetivos do tratamento; nível do tratamento; e estudos de impacto ambiental no corpo receptor (VON SPERLING, 1996). Os níveis de tratamento são classificados em: preliminar, realiza apenas a remoção de sólidos grosseiros; primário, remove sólidos sedimentáveis e uma porção da matéria orgânica; secundário, remove a matéria orgânica e nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo; terciário, remove poluentes não removidos pelo tratamento secundário, trata-se de uma remoção complementar e raramente realizada no Brasil (METCALF; EDDY, 2004; VON SPERLING, 1996). Nos tratamentos preliminar e primário, são predominantes os mecanismos físicos, enquanto no secundário, predominam os mecanismos biológicos (VON SPERLING, 1996).

Os métodos de tratamento são divididos em operações e processos unitários, que podem ser definidos em: operações físicas unitárias, predominadas pelas forças físicas, como gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração; processos químicos unitários, caracterizados pela remoção ou conversão dos contaminantes pela adição de produtos químicos ou em decorrência de reações químicas, como precipitação, adsorção e desinfecção; e processos biológicos unitários, caracterizados pela remoção dos contaminantes por meio da atividade biológica, como remoção da matéria orgânica carbonácea e desnitrificação (METCALF; EDDY, 2004). A integração das operações e processos unitários leva à composição dos sistemas de tratamento.

Devido às limitações financeiras e tecnológicas, o sistema de tratamento mais utilizado pelas lavanderias industriais da região é o físico-químico, contemplando apenas os níveis preliminar e primário. O processo realizado (Figura 1) engloba as etapas de: gradeamento, na qual ocorre a retirada de sólidos grosseiros; equalização, uniformização das descargas de efluentes e ajuste do pH; coagulação-floculação, adição de produtos químicos, como policloreto de alumínio, sulfato de

alumínio e polímeros catiônicos, promovendo a formação de flocos decantáveis; decantação, deposição dos flocos formados na etapa anterior; secagem do lodo, retirada de parte da umidade do lodo têxtil; e filtração, retirada de flocos remanescentes no efluente (CPRH, 2018).

Figura 1: Fluxo do tratamento físico-químico do efluente têxtil



Fonte: A autora (2025).

Esse processo não garante que o efluente possua as características demandadas pelos padrões da legislação ambiental vigente, principalmente em relação ao teor de matéria orgânica. No cenário ideal, deveriam ser instalados processos complementares (CPRH, 2018). Em relação ao lodo têxtil, em muitos contextos sua destinação é desconhecida, sendo descartado de forma irregular no solo ou até mesmo em corpos hídricos (CPRH, 2018). Nesse sentido, são necessários planos de ação e incentivos locais para que as lavanderias industriais operem em consonância com a PNRS (BRASIL, 2010).

O lodo têxtil (Figura 2) é o principal resíduo sólido oriundo das lavanderias industriais, considerado um resíduo de classe II, não perigoso, conforme a ABNT NBR 10004:2004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004; CPRH, 2018). A cada peça processada, são gerados cerca de 60 g desse material residual, considerando que existem cerca de 200 lavanderias no APL de Confecções do Agreste e uma lavanderia de médio porte processa por volta de 100 mil peças por ano, são geradas, anualmente, por volta de 1200 t de lodo têxtil.

Figura 2: Lodo têxtil no leito de secagem da lavanderia industrial



Fonte: CPRH (2018).

As propriedades desse material residual variam conforme as características do processo produtivo têxtil e do sistema de tratamento empregado no efluente gerado (SILVA *et al.*, 2024). A partir dos resultados de ensaios de fluorescência de raios-x (FRX) realizados em amostras de lodo têxtil obtidos na literatura, foi elaborada a Tabela 1, que apresenta a composição inorgânica de diferentes amostras de lodo têxtil.

Tabela 1: Composição inorgânica de diferentes amostras de lodo têxtil

	Autores												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Origem	Etiópia	Índia	China	China	Brasil	Índia	Índia	Etiópia	Índia	Japão	Bangladesh	China	China
CaO	3,50%	22,60%	0,26%	6,34%	6,11%	33,50%	33,20%	23,87%	22,09%	2,80%	3,82%	0,87%	0,94%
Al ₂ O ₃	36,20%	0,48%	50,83%	20,21%	26,62%	0,30%	5,93%	12,73%	3,59%	44,20%	40,20%	6,20%	4,56%
MgO	2,80%	0,30%	-	0,06%	0,78%	1,00%	2,86%	1,79%	-	1,90%	1,42%	-	-
SiO ₂	15,00%	5,83%	41,68%	12,34%	29,52%	3,80%	22,00%	18,51%	15,16%	10,30%	26,20%	3,40%	2,50%
SO ₃	13,40%	-	3,95%	5,76%		0,40%	2,12%	9,33%	-	3,00%	22,00%	24,95%	18,23%
P ₂ O ₅	-	0,99%	-	-	1,97%	-	-	-	3,47%	2,90%	2,66%	2,79%	2,05%
Na ₂ O	-	0,72%	-	1,67%	0,93%	0,06%	0,30%	2,36%	-	12,80%	-	-	-
K ₂ O	-	-	0,33%	0,08%	0,97%	0,04%	1,20%	0,31%	-	1,00%	0,16%	-	-
Fe ₂ O ₃	12,10%	17,90%	0,65%	39,87%	2,45%	18,90%	2,50%	3,19%	-	10,70%	2,20%	60,44%	44,51%
TiO ₂	-	-	2,30%	1,55%	0,16%	-	0,36%	-	1,32%	3,10%	0,43%	0,53%	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-		-	-	-	0,07%	-	0,18%	-	-
MnO	-	0,22%	-	-	0,79%	-	-	-	-	0,10%	0,10%	0,82%	0,60%
OUTROS	17,00%	50,96%	0,00%	12,12%	29,70%	42,00%	29,53%	27,91%	54,30%	7,20%	0,63%	0,00%	26,61%

Vermelho – 1º maior teor | Laranja – 2º maior teor | Verde – 3º maior teor

1 (BESHAH; TIRUYE; MEKONNEN, 2021) ; 2 (CHAUHAN; CHOPRA, 2017); 3 (CHEN; WU, 2018); 4 (CHENG *et al.*, 2023); 5 (GIRONDI DELAQUA *et al.*, 2022); 6 (GOYAL *et al.*, 2019); 7 (GOYAL *et al.*, 2022); 8 (KASAW *et al.*, 2021); 9 (PRIYADHARSHINI *et al.*, 2018); 10 (RAHMAN *et al.*, 2015); 11 (ULLAH *et al.*, 2020); 12 (ZHAN; POON, 2015); 13 (ZHAN *et al.*, 2020).

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2024).

Apesar da composição do lodo têxtil apresentar alta variabilidade entre as amostras analisadas (Tabela 1), é possível observar quatro principais compostos:

óxido de cálcio, com a maior proporção em cinco das treze amostras e terceiro maior em outra; óxido de alumínio, um dos três principais componentes em onze amostras; dióxido de silício, entre os três principais em dez amostras; e óxido de ferro, sendo um dos três principais em seis amostras.

Correlacionando o processo produtivo e o tratamento do efluente têxtil com os resultados observados, podemos considerar que a presença da sílica (SiO_2) advém do uso de argila expandida na estonagem das peças, que prepara o tecido para receber corantes e alvejantes (CPRH, 2018). Em relação aos demais elementos principais (cálcio, alumínio e ferro), estes estão comumente presentes em soluções utilizadas no tratamento físico-químico de efluentes (VON SPERLING, 1996). Na etapa de coagulação-floculação, são empregados principalmente produtos à base de alumínio, porém estes podem ser substituídos por outros à base de ferro. Pode-se admitir que essa substituição foi realizada nas amostras analisadas por Chauhan e Chopra (2017), Goyal *et al.* (2019), Zhan e Poon (2015) e Zhan *et al.* (2020), nas quais há teores elevados de óxido de ferro e reduzidos de óxido de alumínio.

Além da composição inorgânica, propriedades como massa específica e pH são relevantes para entendimento do material residual utilizado, nesse sentido, estas são apresentadas na Tabela 2, para as amostras avaliadas quanto a esses parâmetros.

Tabela 2: Massa específica e pH de diferentes amostras de lodo têxtil

Autores	Origem	Propriedades	
		Massa específica (g/cm^3)	pH
(BALASUBRAMANIAN <i>et al.</i> , 2006)	Índia	2,4	9,13
(BESHAH; TIRUYE; MEKONNEN, 2021)	Etiópia	-	7,44
(CHAUHAN; CHOPRA, 2017)	Índia	2,32	-
(CHEN; WU, 2018)	China	-	6,04
(GOYAL <i>et al.</i> , 2019)	Índia	2,32	-
(HOSSAIN <i>et al.</i> , 2018)	Bangladesh	-	6,4 - 6,7
(KASAW <i>et al.</i> , 2021)	Etiópia	2,73	-
(PRAVEENKUMAR <i>et al.</i> , 2023)	Índia	0,93	7,9
(SAHA <i>et al.</i> , 2022)	Bangladesh	2,3	6,8
(SHATHIKA <i>et al.</i> , 2013)	Índia	2,21	7,14
(ULLAH <i>et al.</i> , 2020)	Bangladesh	-	6,9
(ZHAN; POON, 2015)	China	1,14	-

Fonte: Silva *et al.* (2024).

Para a massa específica, ocorre uma variação entre $0,93 \text{ g/cm}^3$ e $2,73 \text{ g/cm}^3$, o que se relaciona com as diferentes composições observadas. Quanto ao pH, o

menor valor observado foi 6,04 (ácido) e o maior valor, 9,13 (básico), correlacionando com a composição inorgânica (Tabela 1). O potencial básico ocorre nas amostras com elevados teores de minerais como cálcio, magnésio e silício e o ácido, em amostras com elevados teores de alumínio, que em solução como íon Al^{3+} , reage com a água e leva à liberação de íons H^+ (MOURA, 2021; SILVA *et al.*, 2024).

2.1.3 Cinzas de algaroba

No processo de transformação têxtil, são utilizadas caldeiras industriais, que possuem a queima de biomassa como principal fonte de calor (CPRH, 2018). Uma das principais biomassas utilizada no APL de Confecções do Agreste de Pernambuco é a lenha de algaroba. As cinzas de algaroba se caracterizam como um resíduo não perigoso e inerte, portanto de classe IIB, conforme a ABNT NBR 10004:2024. A cada peça processada, são gerados cerca de 156 g de cinzas de algaroba, considerando que existem cerca de 200 lavanderias no APL de Confecções do Agreste e uma lavanderia de médio porte processa por volta de 100 mil peças por ano, são geradas, anualmente, por volta de 3120 t do resíduo. No cenário atual, essas cinzas são encaminhadas para descarte em aterros sanitários e até descartadas de forma irregular (CPRH, 2018).

A algaroba (*Prosopis juliflora*) é uma espécie invasora que foi introduzida no semiárido brasileiro no município de Serra Talhada-PE, em 1942 (BURNETT, 2017). Até meados da década de 1990, o plantio da algaroba foi incentivado na região por meio de ações promovidas por diversas instituições, inclusive governamentais; porém, por se tratar de uma espécie exótica, as algarobeiras se disseminaram rapidamente impactando negativamente as plantas nativas e atualmente seu corte é permitido pelos órgãos ambientais (BURNETT, 2017). Além de promover a retirada de uma espécie invasora, o incentivo ao corte da algaroba tende a reduzir a extração ilegal de plantas nativas.

A caracterização de amostras de cinzas de algaroba provenientes de lavanderias do APL de Confecções do Agreste de Pernambuco foi realizada por alguns autores. A composição química dessas amostras, obtida por meio de análise de FRX, é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição inorgânica de diferentes amostras de cinzas de algaroba

	Autores		
	(MARINHO <i>et al.</i> , 2025)	(MELO <i>et al.</i> , 2018)	(MELO, 2012)
CaO	79,94%	78,66%	77,29%
K ₂ O	10,08%	9,73%	4,96%
MgO	2,45%	3,06%	3,88%
SO ₃	1,76%	1,12%	2,56%
P ₂ O ₅	1,49%	2,35%	4,55%
Cl	1,42%	-	2,25%
OUTROS	1,74%	5,08%	4,51%

Vermelho – 1º maior teor | Laranja – 2º maior teor | Verde – 3º maior teor

Fonte: A autora (2025).

Diferente do comportamento observado para a composição química das amostras de lodo têxtil (Tabela 1), não há muita variabilidade entre as diferentes amostras. Todas apresentam os mesmos cinco componentes principais, sendo eles CaO, K₂O, MgO, SO₃ e P₂O₅, com teores semelhantes para eles.

Além da composição inorgânica, Marinho *et al.* (2025) avaliaram também propriedades físicas das cinzas, que podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades físicas de amostra de cinzas de algaroba

Propriedade física	Resultado
Área superficial (cm ² /g)	4891
Massa unitária (g/cm ³)	0,50
Densidade aparente (g/cm ³)	2,76

Fonte: Adaptado de Marinho *et al.* (2025).

Observa-se, portanto, que o desenvolvimento de materiais alternativos de construção com a incorporação de resíduos industriais têxteis traz contribuições importantes para sua gestão no contexto atual.

2.2 ECONOMIA CIRCULAR

O modelo de produção linear, que segue o fluxo de extração → produção → consumo → descarte, é ineficaz no enfrentamento dos desafios atuais da sociedade, tais como: mudanças climáticas; escassez hídrica; perda da biodiversidade; escassez de recursos naturais; e desigualdades sociais (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018). Esse modelo econômico é focado na redução

dos custos a curto prazo, de modo que a durabilidade e qualidade dos produtos não são fatores de decisão.

O modelo de economia circular se apresenta como uma das soluções para associar o crescimento econômico a um ciclo de desenvolvimento positivo, visando a preservação e aprimoramento do capital natural, otimização da produção de recursos e administração dos estoques renováveis. Além da perspectiva socioambiental, a economia circular traz contribuições para a resiliência dos sistemas econômicos, tendo em vista que é estruturado um ciclo que prolonga a permanência dos materiais, diminuindo a dependência de matérias-primas virgens e a vulnerabilidade ao mercado de *commodities* (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018).

A indústria da construção é elencada no plano de ação para a economia circular, divulgado pela Comissão Europeia em 2020, como uma das principais cadeias de valor que exigem ações urgentes, de forma abrangente e coordenada, para integrar o quadro estratégico de sustentabilidade (COMISSÃO EUROPEIA, 2020).

O conceito de economia circular agrega diversas linhas de pensamento, como ecologia industrial, engenharia do ciclo de vida, gestão do ciclo de vida, entre outras. De forma geral, é entendido que as atividades de uma economia circular são responsáveis pela geração e recuperação de valores dos produtos e serviços, que permanecem a longo prazo no sistema (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018).

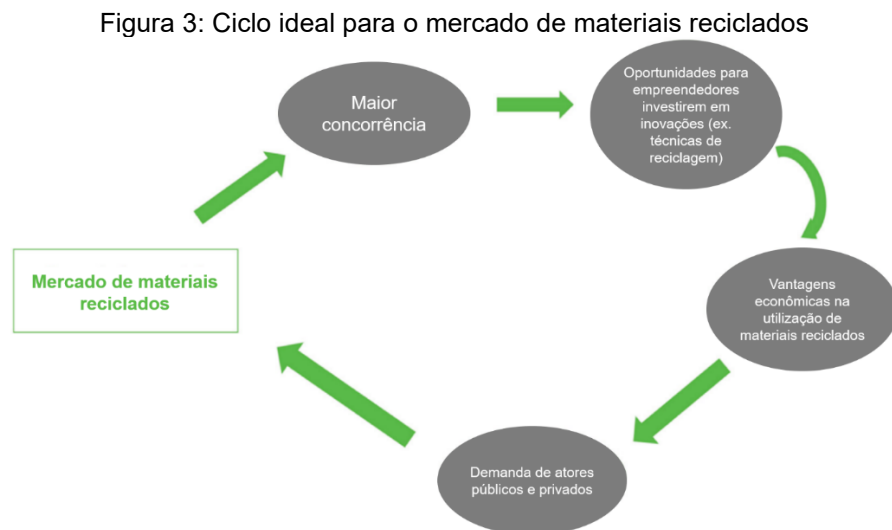
A transição para um modelo econômico circular está atrelada à necessidade de inovação e impulsionada pela geração de impactos positivos (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2018). Nesse sentido, surgem oportunidades para as indústrias, de maneira geral, como: inovação no design de produtos com maior circularidade; redução da dependência de matérias-primas virgens; redução das perdas no processo de produção; aumento da eficiência na distribuição; ampliação dos serviços de manutenção e reparo de produtos; e construção de canais de logística reversa e reciclagem (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

Ao analisar as principais barreiras para implementação da economia circular na última década, foram identificados aspectos como: ausência de mercado; inconsistência das políticas entre os países; custos iniciais altos de investimento e

limitação de acesso a financiamento; e baixa conscientização dos consumidores (GRAFSTRÖM; AASMA, 2021).

Algumas das grandes empresas brasileiras foram consultadas e indicaram que principais motivos de desestímulo à adoção de modelos circulares são: não visualização de vantagens financeiras; ausência de capital para investimento; e falta de conhecimento sobre a economia circular (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

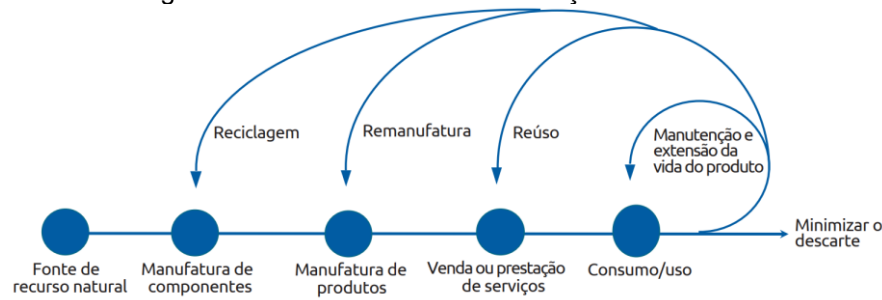
Com a demanda de atores públicos e privados, é formada uma base para o bom funcionamento do mercado, o que aumenta a concorrência e cria oportunidades para inovações, buscando agregar vantagens econômicas na utilização de materiais reciclados (GRAFSTRÖM; AASMA, 2021). Esse ciclo ideal a ser mantido e desenvolvido pode ser visualizado na Figura 3.



Fonte: Adaptado de Grafström; Aasma (2021).

É importante compreender que o valor do recurso tende a ser maior quanto menor o tempo que ele ficou inserido no ciclo, por isso, é recomendado que exista uma sequência de priorização quanto às formas de recirculação, de forma geral, manutenção, reuso, remanufatura e, por fim, reciclagem (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019). O fluxo do processo, incluindo as possibilidades de recirculação de recursos, pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4: Possibilidades de recirculação de recursos



Fonte: Confederação Nacional da Indústria (2019).

Os governos possuem uma grande responsabilidade no processo de transição à circularidade econômica e, mundialmente, têm utilizado alguns instrumentos nessa atuação, sendo eles: regulamentações; ações fiscais; amparo à pesquisa, educação e informação; plataformas colaborativas; auxílios financeiros; investimentos em infraestrutura; e subsídios a negócios. A China, em 2009, foi a primeira nação a promulgar uma política pública específica para a economia circular; porém os países-membros da União Europeia (UE) são os mais avançados nas políticas públicas de transição (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

A UE criou, em 2015, o plano de ação *Closing the Loop*, que tem como objetivo guiar a implementação da economia circular no seu território. Entre as ações prioritárias, pode ser destacada a revisão da legislação de resíduos, buscando: aumento da reciclagem de resíduos sólidos; diminuição da disposição de resíduos nos aterros sanitários; e estímulo ao reúso e simbiose industrial (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

O Brasil teve o maior número de produções científicas relacionadas a economia circular no continente americano e o quinto maior mundialmente, entre 2007 e 2020 (NEGRETE-CARDOSO *et al.*, 2022). Além disso, alguns temas relacionados à circularidade são abordados indiretamente por algumas políticas consolidadas, programas e planos, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), a primeira regulamentação brasileira a abordar a gestão de resíduos de maneira mais completa (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

A PNRS reitera aos geradores dos resíduos a responsabilidade por toda a cadeia envolvida, que inclui fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, buscando assegurar a destinação adequada dos materiais residuais (BRASIL,

2010). Nesse sentido, há um alinhamento da política com as bases da economia circular no incentivo à redução de resíduos gerados e padrões de produção e consumo mais sustentáveis (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

O estágio de inserção da economia circular na política pública nacional é inicial, existem ainda conceitos descentralizados em diversas legislações, programas, planos e projetos. O desenvolvimento de um plano conjunto com ações específicas é necessário para promoção de estratégias concretas (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2019).

Nesse sentido, entrou em vigor em 27 de junho de 2024 o decreto nº 12.082, instituindo a Estratégia Nacional de Economia Circular, que possui como objetivos: estabelecer normas e instituições que incentivem a economia circular; estimular inovação, cultura, educação e capacitação para redução, reutilização e *redesign* sustentável; minimizar o uso de recursos e a geração de resíduos, preservando o valor dos materiais; criar mecanismos financeiros de apoio à economia circular; e fortalecer a cooperação entre governos e a participação de trabalhadores no setor (BRASIL, 2024a).

Com a finalidade de assessorar, monitorar e avaliar a implementação da Estratégia Nacional de Economia Circular no Brasil, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços instituiu, em setembro de 2024, o Fórum Nacional de Economia Circular, formado por 36 representações, advindas de ministérios, agências nacionais, instituições públicas e privadas, organizações da sociedade civil, entre outras (BRASIL, 2024b). O Projeto de Lei 1874/2022, que visa instituir a Política Nacional de Economia Circular (PNEC), já foi aprovado no Senado Federal e segue em tramitação na Câmara dos Deputados, (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2024).

Em decorrência da relação entre essas pautas ambientais e as operações econômicas, emergiram, nas últimas décadas, práticas empresariais de divulgação de desempenho ASG (YAO; MA; ZHANG, 2024). Essas divulgações têm por objetivo apresentar aos *stakeholders* (do inglês, partes interessadas) externos e internos a atuação da companhia, seus compromissos, os riscos e as oportunidades da companhia frente ao contexto das demandas sustentáveis. Com a crescente relevância desses reportes, as empresas passaram a utilizar as divulgações para trazer uma falsa ideia de “sustentabilidade”, comportamento denominado

greenwashing (DAHLMANN; BRANICKI; BRAMMER, 2019; YAO; MA; ZHANG, 2024).

No entendimento das ferramentas para combate dessa prática, foi identificado que é necessário existirem mecanismos que assegurem a autenticidade das informações divulgadas. Esses mecanismos podem ser internos, como auditorias, ou externos, como documentos regulatórios estabelecidos pelos governos para garantir a supervisão dos reportes (YAO; MA; ZHANG, 2024). A intensidade das regulamentações governamentais, o nível de transparência exigido para as informações reportadas e a supervisão da mídia contribuem para redução da prática de *greenwashing* pelas companhias (LI; LI; SHEN, 2024).

Nesse contexto, houve um movimento regulatório global para estabelecer normas rigorosas em relação aos padrões de reporte e asseguarção dos dados reportados, tais como: CSRD, no contexto da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2023); e IFRS S1 e S2, emitidas pelo ISSB. As normas IFRS S1 e S2 foram adotadas pela CVM, vinculada ao Ministério da Fazenda, como diretrizes para o reporte de riscos ASG, obrigatório para as companhias de capital aberto a partir de 2027 (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2023).

Existem diversas metodologias que definem critérios estruturados para mensurar práticas sustentáveis, tais como: selos ambientais; pegada de carbono; ACV; entre outras. Essas ferramentas viabilizam uma maior transparência para reportes relacionados aos temas que englobam, além de possibilitar a comparabilidade entre possíveis soluções.

2.3 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A utilização de resíduos em misturas asfálticas visa a obtenção de misturas mais sustentáveis, garantindo a manutenção ou melhoria das propriedades do material. As metodologias mais comumente utilizadas para incorporação de resíduos no concreto são: úmida, incorporados ao ligante asfáltico; e seca, misturados aos agregados (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A metodologia de incorporação seca foi aplicada para cinzas volantes (CHOI *et al.*, 2020; WOSZUK; BANDURA; FRANUS, 2019), cinzas de casca de arroz (AL-HDABI, 2016; PUTRA JAYA *et al.*, 2018), resíduos da indústria de papel (PASANDÍN *et al.*, 2016), pó de forno de cimento (MODARRES; RAMYAR; AYAR,

2015), pó de resíduos de carvão (MODARRES; RAHMANZADEH; AYAR, 2015) e pó de forno de cal (JITSANIGAM; BISWAS; COMPTON, 2018). Já a metodologia de incorporação úmida foi aplicada em cinzas volantes (JAMSHIDI; MOHD HASAN; LEE, 2018; NASSAR *et al.*, 2016), cinzas de biomassa (MELOTTI *et al.*, 2013) e pós de granito e calcário (BARRA *et al.*, 2014).

A incorporação de cinzas volantes em concreto asfáltico foi realizada por diversos autores (ALI; FIAZ, 2009; ALI *et al.*, 1996; ÇELIK, 2008; CHURCHILL; AMIRKHANIAN, 1999; MODARRES; RAHMANZADEH, 2014; RONGALI *et al.*, 2013; SOBOLEV *et al.*, 2014; VASUDEVAN, 2013). Na substituição de 5% de agregado convencional pelas cinzas, foi observado aumento na estabilidade Marshall (ÇELIK, 2008). Ao ser incorporado teor de 5,3%, em relação à massa total da mistura, foi observado aumento do módulo de resiliência (RONGALI *et al.*, 2013). Também foi observada redução do volume de vazios com a incorporação de 1% de cinzas volantes à mistura (VASUDEVAN, 2013). Outro aspecto atrativo das cinzas volantes é o custo; o material residual pode auxiliar em projetos com orçamento restrito para os locais próximos a fontes geradoras (SOBOLEV *et al.*, 2014).

A utilização de resíduos da lavagem de carvão foi comparada a fileres tradicionalmente utilizados (pó calcário, o pó zeolítico e o cimento Portland) e foi observado que a estabilidade Marshall da mistura com o material residual aumentou em torno de 17% (MODARRES; RAHMANZADEH; AYAR, 2015). Para o estudo, também foi realizado ensaio de lixiviação, por meio do qual foi observado que a mistura asfáltica foi eficiente em estabilizar os metais pesados presentes no resíduo.

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram incorporadas em concretos asfálticos por alguns autores (HUWAE; PARERA; TANIJAYA, 2016; ZAINUDIN *et al.*, 2016). Utilizando um teor de cinzas de cana-de-açúcar de 60%, em relação à massa de ligante, foram obtidos resultados mecânicos dentro dos limites normativos, apesar de inferiores à referência (HUWAE; PARERA; TANIJAYA, 2016). Foram observados também incrementos na estabilidade Marshall (0,6%) e no módulo de resiliência (17,4%) a partir da utilização das cinzas (ZAINUDIN *et al.*, 2016). As cinzas de casca de arroz também promoveram resultados positivos ao serem incorporadas em concreto asfáltico substituindo 50% do filer calcário utilizado, foi observado incremento de 15% na estabilidade Marshall, quando comparadas as amostras apenas com calcário (SARGIN *et al.*, 2013). O aumento da estabilidade

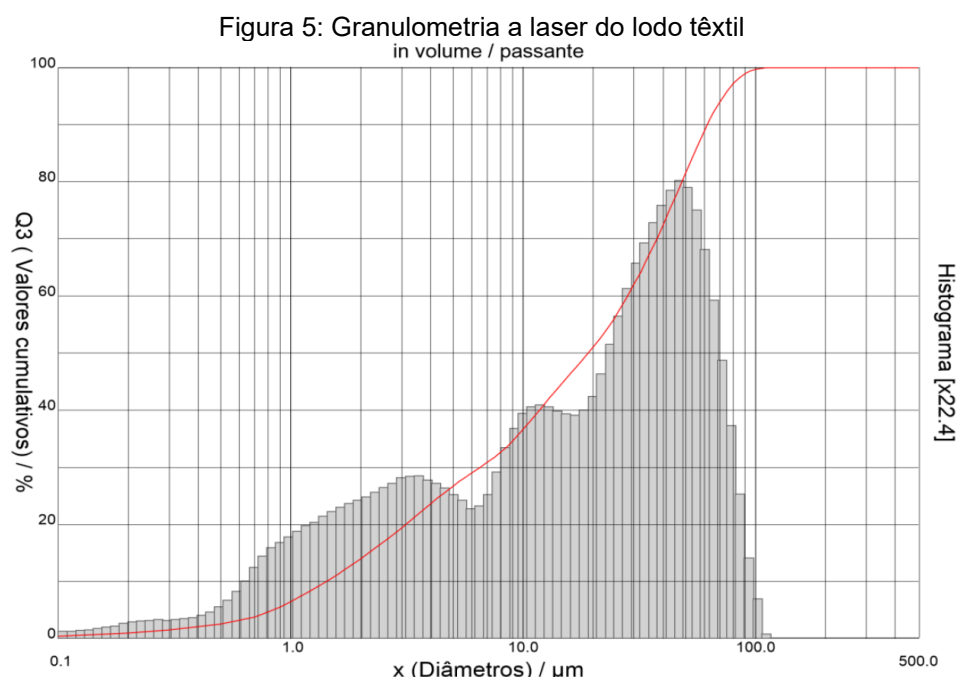
Marshall em decorrência da incorporação dessas cinzas atingiu até 65% (AL-HDABI, 2016).

Na utilização de pó de vidro em teor de 7%, em relação à massa total, foi obtido aumento de cerca de 13% da estabilidade Marshall, quando comparado às misturas contendo fíleres convencionais (JONY; AL-RUBAIE; JAHAD, 2011). Também foi avaliada a utilização de resíduos de vidro em granulometria de filer e agregado miúdo conjuntamente, sendo 10% o teor ótimo de substituição (SALEM *et al.*, 2017).

Pode-se observar, de maneira geral, que as misturas asfálticas representam importante matriz para aprisionamento de resíduos diversos, mantendo ou melhorando suas propriedades técnicas.

2.3.1 Incorporação dos resíduos têxteis no concreto asfáltico

O lodo têxtil foi incorporado no concreto asfáltico como filer, previamente misturado ao ligante e diretamente incorporado aos agregados em teores de 2 a 5% (MOURA, 2021). Para atingir a faixa granulométrica almejada, foi necessária a realização de algumas etapas de pré-tratamento no material residual, secagem e destorroamento (MOURA, 2021). O resultado da granulometria a laser realizada no material pré-tratado pode ser visualizado na Figura 11.



Fonte: Moura (2021).

Para atender aos parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para concretos asfálticos de faixa “C”, Moura (2021) observou que o limite de incorporação do lodo têxtil foi de 3%, ao misturá-lo previamente ao ligante. Dessa forma, os ensaios mecânicos foram realizados nas misturas com teores de resíduo até o limite definido. Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração podem ser visualizados na Figura 12 e estabilidade Marshall, na Figura 13.

Figura 6: Resistência à tração de concretos asfálticos com lodo têxtil

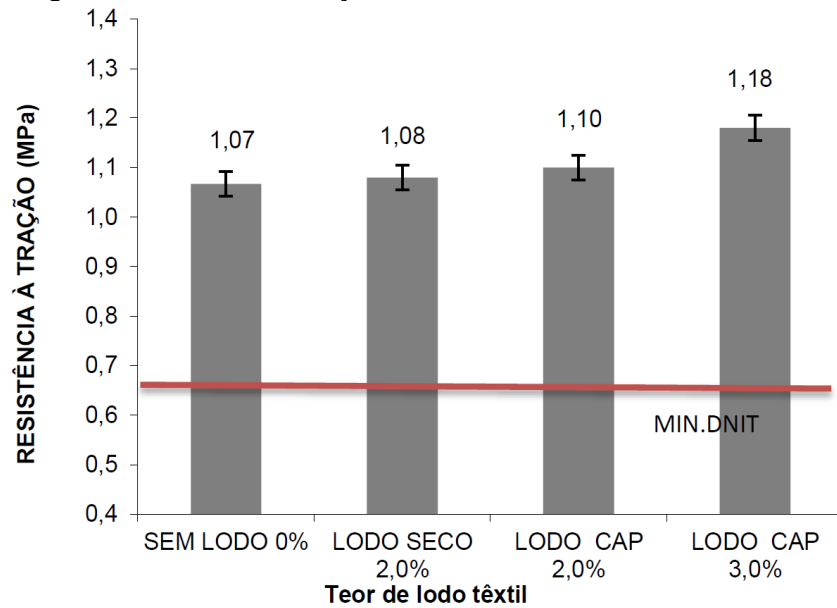
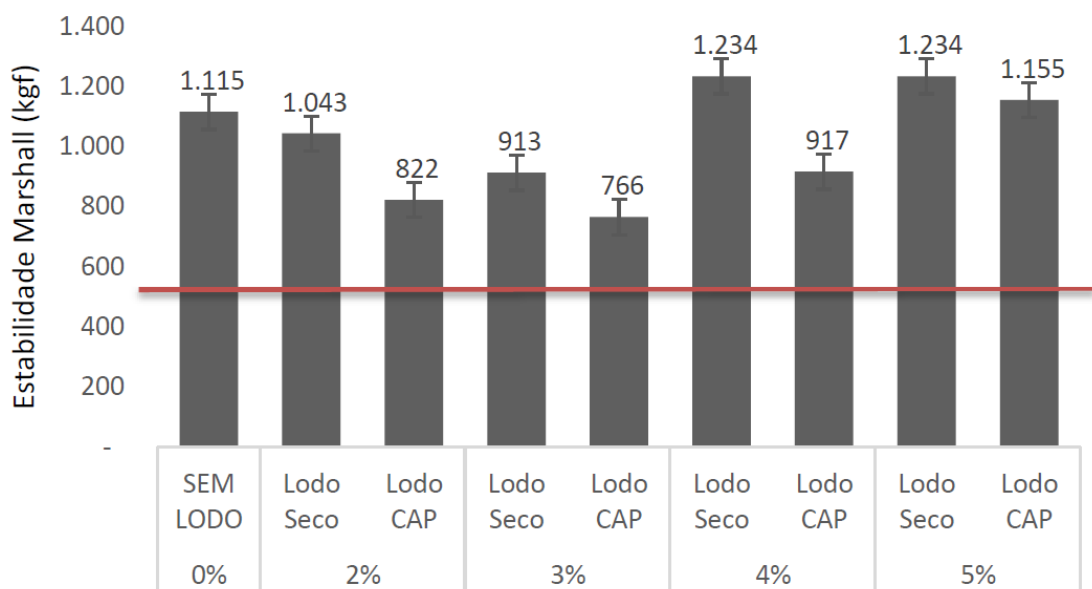
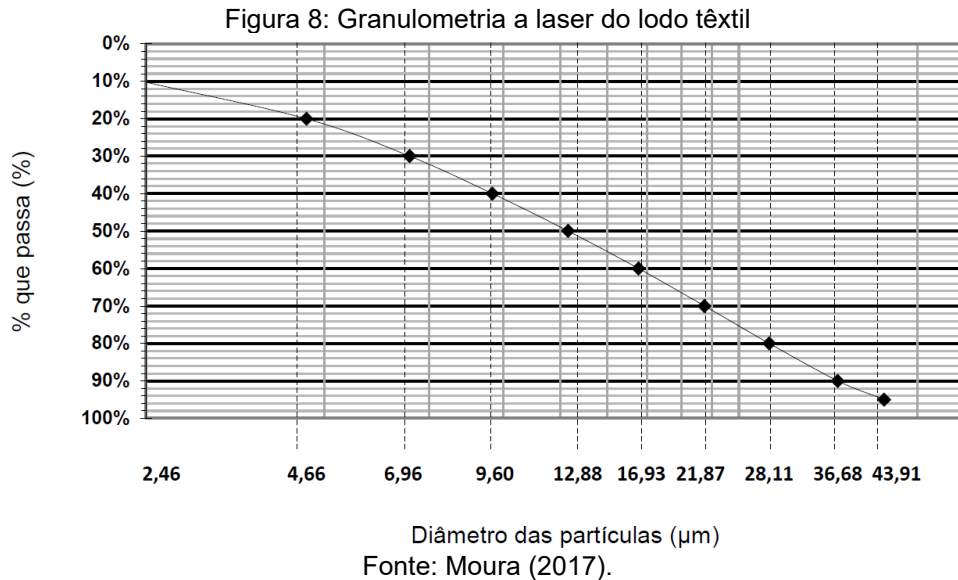


Figura 7: Estabilidade Marshall de concretos asfálticos com lodo têxtil



As cinzas de algaroba foram incorporadas no concreto asfáltico diretamente ao ligante, como filler, em teores de 3,5 a 4,5% (MOURA, 2017). Para obter a faixa granulométrica desejada, o material foi peneirado e sua granulometria a laser pode ser visualizada na Figura 8.



Os parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para concretos asfálticos de faixa “C” foram atendidos até o limite de incorporação de 4% das cinzas. Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à tração podem ser visualizados na Figura 9 e estabilidade Marshall, na Figura 10.

Figura 9: Resistência à tração de concretos asfálticos com cinzas de algaroba

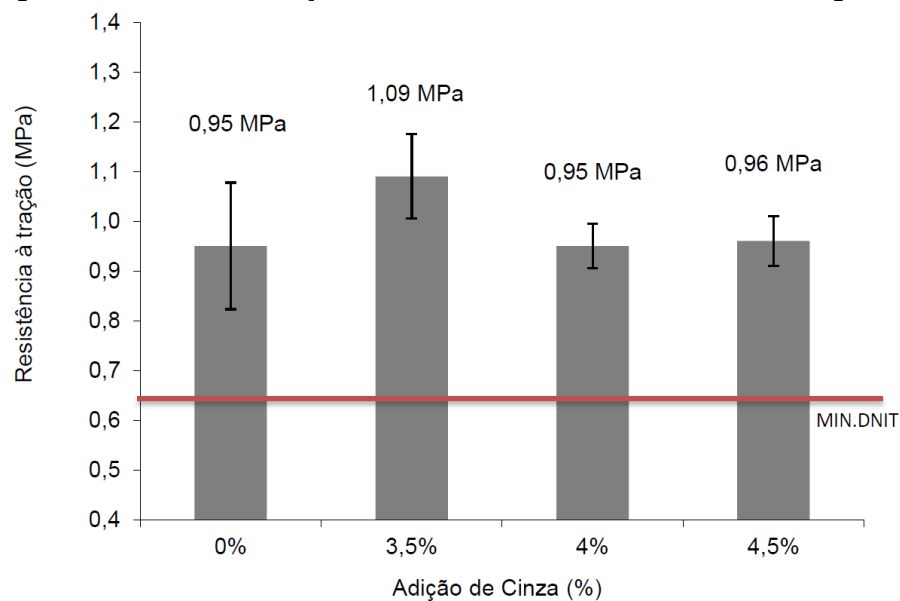
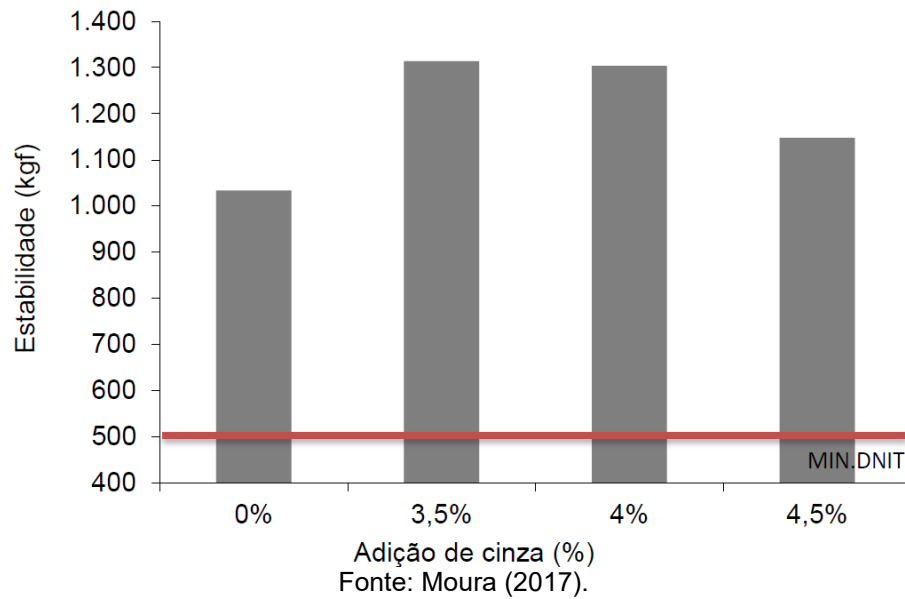
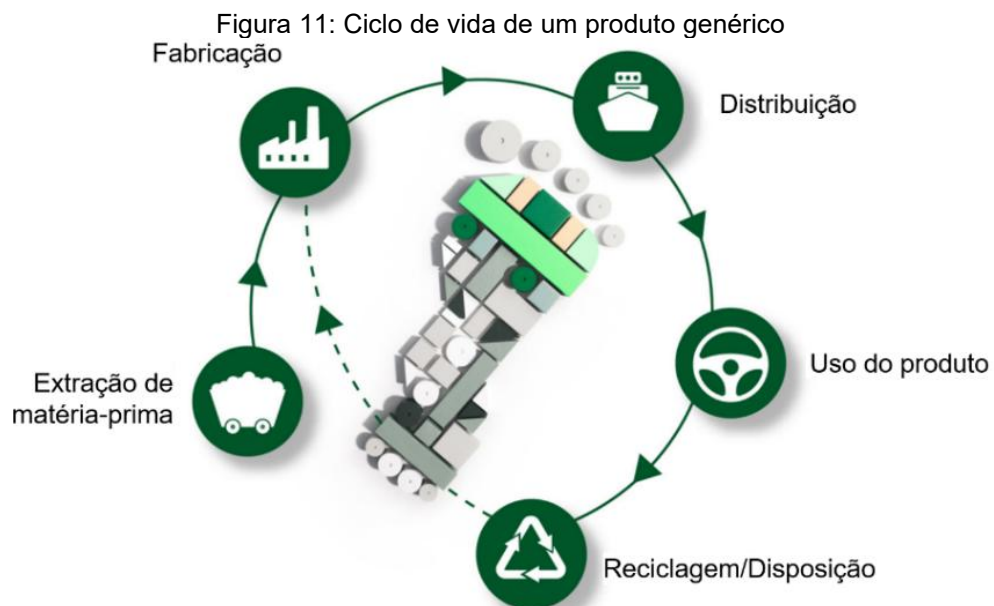


Figura 10: Estabilidade Marshall de concretos asfálticos com cinzas de algaroba



2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma metodologia que propõe a realização de estimativas dos fluxos de materiais e energia envolvidos no ciclo de vida de um produto (Figura 11), com o objetivo de mensurar os impactos ambientais relacionados a ele (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).



Fonte: Adaptado de Jungmeier; Canella; Schwarzinger (2023).

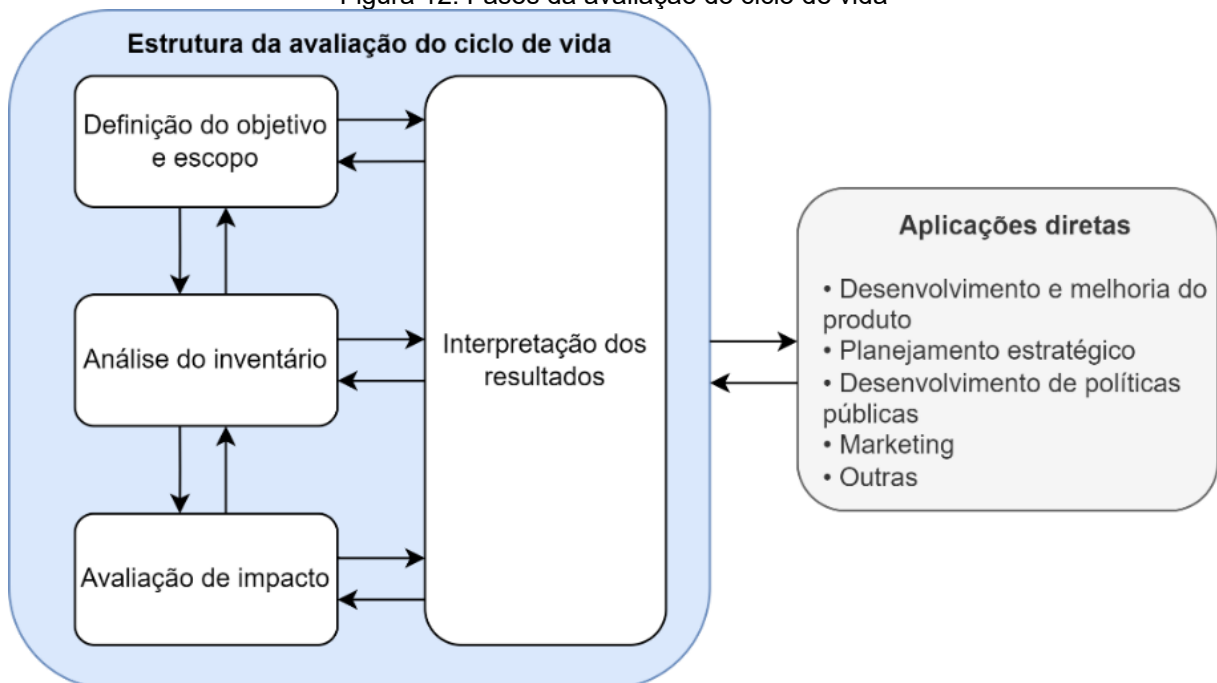
As etapas gerais do ciclo de vida de um produto incluem: extração de matérias-primas, fabricação, distribuição, uso do produto, reciclagem e descarte

final. Por meio da ACV, é possível comparar diferentes sistemas que possuem a mesma finalidade, analisar a quais fases estão relacionados os maiores impactos ambientais e identificar oportunidades mais sustentáveis (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).

Os resultados da ACV são estimados, tendo em vista que não há como identificar de maneira completa todas as contribuições ambientais no ciclo de vida de um produto. Porém, com o desenvolvimento da metodologia nos últimos anos, os bancos de dados utilizados foram aprimorados e é possível obter resultados cada vez mais precisos (SUPPIPAT *et al.*, 2023).

Há duas normas principais que trazem definições e orientações acerca da realização de ACVs: NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a), que apresenta princípios e estrutura; e a NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), abrangendo requisitos e orientações. Conforme a NBR ISO 14040, a ACV possui quatro fases: definição do objetivo e escopo; análise do inventário; avaliação de impacto; e interpretação dos resultados (Figura 12).

Figura 12: Fases da avaliação do ciclo de vida



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009).

2.4.1 Definição do objetivo e escopo

A primeira fase de qualquer ACV é a definição do objetivo, por meio do qual são estabelecidos os contextos decisórios, as aplicações do estudo e seu público-alvo. Essa fase tem importância decisiva em relação às demais fases, pois guia os aspectos da definição do escopo, controla a qualidade do trabalho e determina a forma como os resultados serão avaliados e interpretados (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Assim, a definição clara do objetivo da ACV é essencial para garantir a correta interpretação dos resultados, além de guiá-los de acordo com o escopo para o qual foram realizados.

Na fase de definição do escopo, é definido, de forma detalhada, o objeto do estudo da ACV. A principal parte da definição do escopo é estabelecer os requisitos metodológicos que irão guiar o processo com base no objetivo do estudo (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Devem ser definidos e descritos os seguintes itens: produtos do estudo, em conformidade com suas aplicações; sistema estudados, suas funções, unidade funcional e fluxos de referência; estrutura de modelagem do inventário do ciclo de vida (ICV); fronteiras do sistema, seus requisitos de completude e regras de corte; categorias de impacto cobertas e métodos a serem aplicados; e requisitos de qualidade dos dados do ICV (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

A descrição clara dos parâmetros definidos para um estudo de ACV assegura sua reprodutibilidade, o que contribui para a credibilidade do estudo, além de viabilizar sua revisão (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Assim, faz-se necessário detalhar, de forma qualitativa e quantitativa, os métodos, inferências e dados utilizados.

Os produtos do estudo derivam das aplicações pretendidas; os mais comuns são, em ordem crescente de abrangência e complexidade: estudo de ICV; estudo de resultados de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV); estudo não comparativo de ACV; estudo comparativo de ACV; e modelo detalhado de ICV do sistema detalhado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

A estrutura de modelagem do ICV pode ser realizada com base em duas abordagens: o modelo atribucional, que descreve a cadeia de suprimentos específica, considerando o estado atual do sistema; e o modelo consequencial, que

descreve a cadeia de suprimentos de maneira genérica, pois o foco é compreender as consequências das alterações no sistema (SUPPIPAT *et al.*, 2023).

A função e a unidade funcional de um sistema possibilitam a comparação entre soluções. A função define de forma quantitativa e qualitativa o objeto estudado, geralmente especificada por meio de uma unidade funcional, que nomeia e quantifica os parâmetros das funções do objeto, respondendo às questões “o quê”, “quanto”, “quão bem” e “por quanto tempo” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b). Considerando um produto, um exemplo de unidade funcional poderia ser: cobertura completa de 1 m² de parede externa por 10 anos com 99,9% de opacidade (EUROPEAN COMMISSION, 2010). O fluxo de referência traz a relação quantitativa entre os fluxos de entrada e saída, por exemplo, para a unidade funcional descrita anteriormente, um possível fluxo de entrada seria 0,7 L de tinta ‘A’. A localização também é um aspecto importante e deve ser identificada no fluxo de referência (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a).

Na escolha das categorias de impacto, é importante garantir que cubram todas as questões ambientais relacionadas ao sistema analisado. Assim, caso se opte pela exclusão de impactos relevantes, essa deve ser documentada e considerada na interpretação dos resultados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

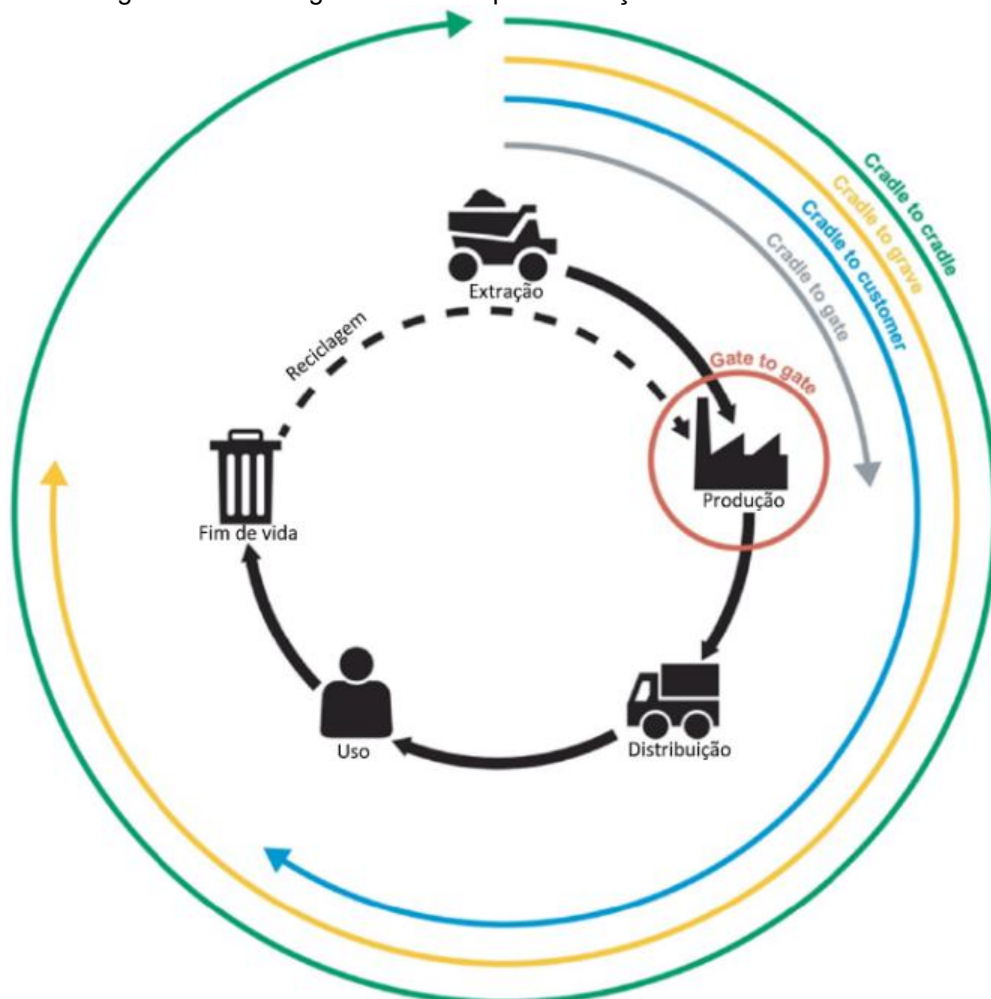
As categorias de impacto de nível *midpoint* (do inglês, ponto médio) são: mudança climática (em inglês, *climate change*); depleção da camada de ozônio (em inglês, *ozone depletion*); toxicidade humana (em inglês, *human toxicity*); inorgânicos respiratórios (em inglês, *respiratory inorganics*); radiação ionizante (em inglês, *ionising radiation*); formação de ozônio troposférico (em inglês, *photochemical ozone formation*); acidificação (em inglês, *acidification*); eutrofização (em inglês, *eutrophication*); ecotoxicidade (em inglês, *ecotoxicity*); uso do solo (em inglês, *land use*); e depleção de recursos (em inglês, *resource depletion*). As categorias de impacto de nível *endpoint* (do inglês, ponto final) são, além das de ponto médio: danos à saúde humana (em inglês, *damage to human health*); danos ao ecossistema (em inglês, *damage to ecosystem*); e depleção de recursos naturais (em inglês, *depletion of natural resources*) (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Os requisitos de qualidade dos dados do ICV podem ser estruturados com base em: representatividade, em aspectos tecnológicos, geográficos e relacionados; completude, em termos da cobertura das categorias de impacto no inventário;

precisão/incerteza, em relação aos dados coletados ou modelados; e adequação e consistência da metodologia (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).

As fronteiras do sistema definem quais processos elementares do ciclo de vida compõem o sistema analisado. Na modelagem do sistema do produto, é ideal que os fluxos de entrada e saída sejam elementares. Algumas das principais abordagens de fronteiras utilizadas na ACV são: *cradle-to-cradle* (do inglês, do berço ao berço); *cradle-to-grave* (do inglês, do berço ao túmulo); *cradle-to-customer* (do inglês, do berço ao consumidor); *cradle-to-gate* (do inglês, do berço ao portão); e *gate-to-gate* (do inglês, do portão ao portão) (EUROPEAN COMMISSION, 2010). A relação entre essas abordagens e o ciclo de vida de um produto genérico pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13: Abordagens utilizadas para definição de fronteiras de ACV



Fonte: Adaptado de Suppipat *et al.* (2023).

2.4.2 Análise do inventário

A fase de ICV envolve a coleta de dados necessários para construção dos fluxos de entrada e saída dos processos e outras informações relevantes, identificadas na definição do escopo. Os fluxos dos processos podem ser: fluxos elementares, como recursos e emissões, também intervenções na ecosfera; fluxos de produtos, como bens e serviços, produtos ou insumos de um dado processo, que conectam o processo analisado a outros; fluxos de resíduos, como resíduos sólidos ou líquidos e águas residuais, que devem ser vinculados a processos de gestão de resíduos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

De forma geral, o ICV engloba as seguintes etapas: identificação dos processos necessários para o sistema; planejamento da coleta de dados brutos e informações; coleta de dados de inventário no nível de unidade de processo do sistema primário analisado; desenvolvimento de dados genéricos de ICV, quando dados médios ou específicos não estão disponíveis e não podem ser desenvolvidos; obtenção de dados complementares; medição de dados de ICV para processos ou produtos; modelagem do sistema; e cálculo dos resultados do ICV (SUPPIPAT *et al.*, 2023).

Na realização dos cálculos do inventário, é necessário aplicar os mesmos procedimentos ao longo de todo o estudo de ACV, para que os resultados sejam consistentes. Dependendo do objetivo e escopo definidos para o estudo, devem ser realizadas análises de cenários e cálculos de incerteza, principalmente em cenários nos quais são realizadas comparações de produtos ou de estratégias futuras (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.4.3 Avaliação dos impactos do ciclo de vida

Na fase de AICV, os fluxos elementares de entrada e saída, a partir das informações coletadas e relatadas no inventário, culminam nos resultados dos indicadores de impacto. Esses resultados devem ser visualizados como indicadores de potencial de impacto ambiental, não previsões de efeitos reais (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

A AICV deve ser realizada mesmo que o estudo tenha foco no ICV e seus resultados devem ser considerados como base para a análise de sensibilidade. Por conta da abordagem iterativa da ACV, o conjunto de dados do inventário deve ser avaliado por meio dos resultados obtidos na AICV, visando a melhoria progressiva dos dados. Esse processo pode incluir, ainda, a normalização e a ponderação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b).

Para as categorias de impacto individuais, os resultados da AICV são apresentados, de forma geral, em valores equivalentes ou de dano para indicadores de nível final. O potencial de aquecimento global (em inglês, *Global Warming Potential* – GWP) é expresso, por exemplo, em kg de CO₂ equivalente. Para a saúde humana, pode ser utilizado o indicador *Disability Adjusted Life Years* (DALY), que equivale a um ano perdido de vida saudável (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.4.4 Interpretação dos resultados

A interpretação da ACV ocorre em três etapas: identificação das questões significativas; avaliação dessas questões; e a formulação das conclusões e recomendações. Além disso, também é objetivo da interpretação orientar o trabalho realizado, buscando a melhoria do modelo do ICV. Os resultados são utilizados para trazer as respostas às questões definidas no objetivo do estudo. É importante que a interpretação auxilie na compreensão, também, das possíveis limitações do estudo. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b; EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.4.5 Abordagem iterativa

Para que os resultados da ACV possuam a precisão desejada, é necessário que a coleta de dados e a seleção de fontes externas sejam realizadas de forma iterativa. O processo pode ser auxiliado por especialistas, para identificação dos principais processos e fluxos elementares do sistema. Na modelagem inicial do ICV, os dados de alguns processos-chave podem ser insuficientes e exigir uma coleta mais detalhada, portanto, o inventário é aprimorado (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Nos estudos comparativos, pode ocorrer das alternativas comparadas apresentarem desempenho ambiental muito semelhante, não sendo possível identificar a melhor alternativa. Em alguns casos, devido ao acesso limitado a dados-chave, pode ser difícil melhorar a qualidade geral dos dados, de modo que, devido às limitações, não deve ser concluído que não existem diferenças significativas. É importante que essas questões, além de revisões substanciais no objetivo e escopo, sejam documentadas (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

2.4.6 ACV de misturas asfálticas

A ACV pode ser utilizada para avaliar o desempenho ambiental de misturas asfálticas, principalmente para compreender, por meio de análises comparativas, o efeito da utilização de materiais alternativos. De forma geral, foi observado que há uma grande variabilidade nas previsões de impacto ambiental das misturas asfálticas, o que exige a utilização da incerteza para interpretação dos resultados obtidos, também incluir na análise a durabilidade do material, tendo em vista que misturas duráveis possibilitam um menor consumo de asfalto ao longo do período analisado (ABED *et al.*, 2024; SUWARTO; PARRY; AIREY, 2024; WANG *et al.*, 2021).

No Canadá, foram avaliadas estratégias de adaptação às mudanças climáticas para pavimentos asfálticos, utilizando ACV e avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV), por meio das quais visualizou-se que, mesmo com o aumento dos custos de implementação, estes foram compensados ao longo da vida útil da estrutura (SWARNA; HOSSAIN; BERNIER, 2022). Ao avaliar a metodologia utilizada na ACV e ACCV de novos materiais utilizados em pavimentos asfálticos, foi observado que estes geram impactos nos custos de manutenção e fim de vida, demonstrando a importância da compreensão dos custos e impactos ambientais dessas inovações a curto e longo prazo (SUWARTO; PARRY; AIREY, 2024).

A ACV foi utilizada no estudo dos impactos ambientais de diversas misturas asfálticas utilizando materiais alternativos, como: aditivos compostos de lignina e fibras de vidro (KHATER *et al.*, 2021); compósito alternativo de pó de diatomita e fibra de lignina (YUE *et al.*, 2022); resíduos de construção e demolição, resíduos de cimentação a jato, cinzas volantes e pavimento asfáltico recuperado (ORETO *et al.*,

2021); e agregados artificiais provenientes da incineração de resíduos sólidos urbanos (ORETO *et al.*, 2024).

A avaliação de pavimentos asfálticos produzidos com materiais reciclados, nos cenários estudados, demonstrou que o principal fator responsável pelos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida foi a produção do ligante asfáltico, o que incentiva a busca por alternativas que reduzam o seu teor nas misturas (ABDALLA; FAHEEM; WALTERS, 2022). Além do processo produtivo do ligante, que apresentou a maior contribuição de impacto na maioria das categorias analisadas, o processo de extração dos agregados teve o maior percentual de contribuição na categoria de impacto “potencial de ecotoxicidade terrestre” (KHATER *et al.*, 2021; YUE *et al.*, 2022). Também foi verificado que o processo de produção de um dos aditivos utilizados, a fibra de vidro, teve a maior contribuição para a categoria potencial de toxicidade humana (KHATER *et al.*, 2021).

2.5 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na região Agreste de Pernambuco, a indústria têxtil possui grande relevância econômica, mas os processos produtivos do setor estão relacionados a impactos ambientais diversos, dentre os quais se destaca a geração de resíduos sólidos, principalmente o lodo têxtil e as cinzas de algaroba. Considerando o volume de resíduos gerado, é necessário que sejam implementadas soluções alternativas à destinação em aterros sanitários.

A circularidade emergiu nas últimas décadas e tem sido introduzida na economia global por meio de iniciativas governamentais isoladas, como na União Europeia e China. O conceito central da economia circular é prolongar a permanência dos recursos no ciclo produtivo a partir da recirculação, atendendo à seguinte priorização: manutenção, reuso, remanufatura e reciclagem.

Nesse sentido, foi avaliada a incorporação desses materiais residuais em concretos asfálticos, substituindo parcialmente os agregados naturais e atuando como fíleres nas misturas. Os resultados obtidos atenderam aos parâmetros da metodologia de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para concretos asfálticos de faixa “C” e demonstraram a equivalência funcional entre as misturas alternativas e convencional.

Apesar da sua relevância como alternativa à destinação dos resíduos para aterros sanitários, é preciso compreender o desempenho ambiental dessas soluções de circularidade. A ACV é uma metodologia que pode dar suporte a esse processo, por meio da quantificação dos impactos relacionados às misturas asfálticas. Ao executá-la devem ser atendidos os requisitos das normas orientadoras NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 e é recomendado que seja seguida uma abordagem iterativa, implementa melhorias contínuas na modelagem.

3 METODOLOGIA

A ACV foi realizada conforme definido pelas normas NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a) e NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b), assim, são apresentadas nas seções a seguir: objetivo e escopo do estudo; inventário elaborado; e procedimento de avaliação dos impactos do ciclo de vida.

3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo da ACV foi avaliar o desempenho ambiental de concretos asfálticos com incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba, comparando-os ao concreto asfáltico convencional, com parâmetros de dosagem e contexto de produção semelhantes. O estudo tem como público-alvo acadêmicos e profissionais do setor.

A unidade funcional considerada foi 1 tonelada de concreto asfáltico para aplicação em camada de revestimento de pavimento, considerando as misturas e cenários descritos na seção 3.1.1. Essa unidade foi escolhida por se tratar da referência comumente utilizada na aquisição de misturas asfálticas e nos estudos de ACV.

3.1.1 Sistemas de produto

O concreto asfáltico é um tipo de revestimento aplicado em pavimentos, fabricado a partir de uma mistura de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI *et al.*, 2022). O ciclo de vida do concreto asfáltico engloba: a extração e processamento das matérias-primas; o transporte das matérias-primas até a usina; a produção; aplicação in loco; utilização; e, por fim, reutilização ou destinação. Os resíduos têxteis incorporados ao concreto asfáltico foram considerados como fíler, substituindo os agregados naturais utilizados convencionalmente. Para serem utilizados nas misturas asfálticas, os resíduos necessitam de um processamento que inclui secagem e destorroamento, no caso do lodo, e, para as cinzas de algaroba, peneiramento.

Foram avaliadas três misturas: a referência (REF), sem incorporação do resíduo; e com os teores ótimos dos resíduos, para o lodo têxtil, 3% (3LT) e, para as

cinzas de algaroba, 4% (4CA). Para essas misturas, foram consideradas a composição e características dos materiais dosados e avaliados por meio de ensaios mecânicos, microestruturais e de aprisionamento do resíduo por Moura (2021) e Moura (2017). Por meio dos resultados apresentados na seção 2.3.1, é possível atestar a equivalência funcional entre os sistemas avaliados, tendo em vista que atendem aos parâmetros de dosagem Marshall e da norma DNIT ES 31/2006 para concretos asfálticos de faixa “C”.

Para fins de AICV, as características granulométricas dos diferentes agregados naturais utilizados foram desconsideradas, de forma que, na Tabela 5, são apresentados os teores, em massa, dos resíduos, do cimento asfáltico de petróleo (CAP) e do agregado natural em cada mistura.

Tabela 5: Composição das misturas avaliadas

Mistura	Teor de resíduo (%)	CAP (%)	Agregado natural (%)
REF	0,0	5,5	94,5
3LT	3,0 (lodo têxtil)	5,5	91,5
4CA	4,0 (cinzas de algaroba)	5,5	90,5

Fonte: A autora (2025).

Considerando que a utilização dos resíduos têxteis nas misturas asfálticas é uma alternativa para o cenário local, foi avaliada a sensibilidade da variação dos impactos do ciclo de vida mensurados à distância pela qual seriam transportados (Tabela 6). Os cenários simulam possíveis deslocamentos tanto no entorno de cada município quanto entre os três principais polos do APL de Confecções do Agreste de Pernambuco: Caruaru; Toritama, a cerca de 30 km de Caruaru; e Santa Cruz do Capibaribe; a cerca de 60 km de Caruaru.

Tabela 6: Cenários considerados na avaliação

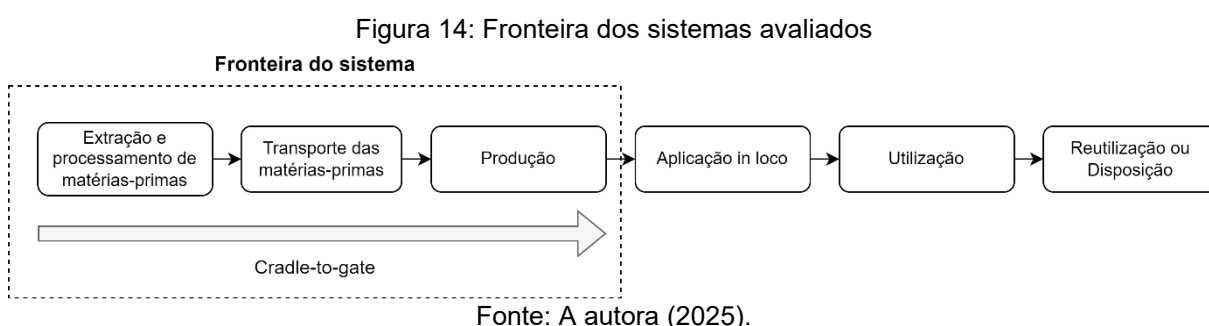
Cenário	Distância de transporte dos resíduos (km)
C1	10
C2	30
C3	60

Fonte: A autora (2025).

Dessa forma, foram avaliados sistemas de produto considerando as diferentes misturas de concreto asfáltico e os cenários descritos.

3.1.2 Fronteira do sistema

A fronteira considerada para os sistemas foi *cradle-to-gate*, da extração e processamento de matérias-primas até a produção do material, conforme apresentado na Figura 14. As demais fases do ciclo de vida não foram consideradas, pois demandariam estudos mais complexos para medição ou estimativa dos dados que compõem o inventário, inviáveis no contexto deste trabalho.



3.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

O inventário do ciclo de vida foi construído, principalmente, a partir de dados primários dos sistemas apresentados e dados secundários da base Ecoinvent, na versão 3.9.1, publicada em dezembro de 2022. As bases de dados Ecoinvent possuem abrangência global e atendem aos padrões das normas ISO 14040 e ISO 14044, o que contribui para maior robustez e comparabilidade dos estudos, tornando-as amplamente utilizadas (LI *et al.*, 2024; LI; ZHU; WANG, 2024; MOINS *et al.*, 2024; ORETO *et al.*, 2024; YAO *et al.*, 2022).

No contexto do APL de Confecções do Agreste de Pernambuco, o lodo têxtil e as cinzas de algaroba são resíduos e não possuem valor econômico, ou seja, não são coprodutos, por isso são contabilizados na ACV apenas os fluxos relacionados aos seus processamentos. Por se tratar de dados específicos e não estarem disponíveis no Ecoinvent, os fluxos relacionados ao processamento do lodo têxtil e das cinzas de algaroba e à produção do concreto asfáltico foram estimados por meio de informações técnicas de equipamentos e da literatura. Essas estimativas são uma limitação do estudo pois agregam incertezas aos valores mensurados para os

impactos de cada categoria estudada, tendo em vista que foi considerado o cenário de equipamentos específicos com os dados informados pelos fabricantes.

3.2.1 Processamento do lodo têxtil

O processamento do lodo têxtil para incorporação no concreto asfáltico inclui as etapas de secagem e moagem, para que o material tenha as características de umidade e granulométricas esperadas. Os estudos existentes foram realizados apenas em escala laboratorial, assim, foram realizadas estimativas para obtenção de dados considerando uma escala de usina comercial. Para o processo de secagem, foi considerado o secador indireto modelo Bruthus F 5.6.1, produzido pela Albrecht (ALBRECHT, 2022). Em relação ao processo de moagem, foi considerado o moinho de martelos modelo 036 – BCO, produzido pela Verdés (VERDÉS, 2021). As informações técnicas dos equipamentos são descritas na Tabela 7.

Tabela 7: Características dos equipamentos considerados no processamento do lodo têxtil

Processamento	Equipamento	Fabricante	Modelo	Informações técnicas
Secagem do lodo têxtil	Secador indireto	Albrecht	Bruthus F 5.6.1	Produção: 300 kg/h Potência: 3,3 kW
Moagem do lodo têxtil	Moinho de martelos	Verdés	036 – BCO	Produção: 15 t/h Potência: 75,0 kW

Fonte: A autora (2025).

Considerando o teor de umidade do lodo coletado no leito de secagem de 40% (METCALF; EDDY, 2004), para obter 1 tonelada de lodo têxtil com teor de umidade de 5%, seria necessário inserir no secador indireto cerca de 1,6 tonelada do resíduo. Com base na capacidade produtiva e potência dos equipamentos adotados, são apresentadas, na Tabela 8, as estimativas de consumo energético para obtenção de 1 tonelada de lodo têxtil seco e destorroado.

Tabela 8: Consumo energético no processamento do lodo têxtil

Processamento	Potência do equipamento (kW)	Consumo energético (kWh)
Secagem do lodo têxtil	3,3	17,4
Moagem do lodo têxtil	75,0	5,0

Fonte: A autora (2025).

Portanto, o consumo energético estimado para produção de 1 tonelada de lodo têxtil seco e destorroado, com base nos parâmetros apresentados e

equipamentos descritos, é de 22,4 kWh. Para visualização adequada dos impactos relacionados ao processamento do lodo têxtil, foi estruturado um processo à parte, sendo as entradas o resíduo com teor de 40% de umidade e o consumo energético, tendo como saída o lodo processado.

3.2.2 Processamento das cinzas de algaroba

O processamento das cinzas de algaroba para incorporação no concreto asfáltico inclui apenas a etapa de peneiramento, para obter um material com as características granulométricas esperadas. Para esse processo, foi considerada a peneira rotativa vibratória horizontal, produzida pela Coppi Industrial, cujas informações técnicas são descritas na Tabela 9.

Tabela 9: Características dos equipamentos considerados no processamento do lodo têxtil

Processamento	Equipamento	Fabricante	Modelo	Informações técnicas
Peneiramento das cinzas de algaroba	Peneira rotativa vibratória horizontal	Coppi Industrial	PRHV	Produção: 6 t/h Potência: 7,4 kW

Fonte: A autora (2025).

Com base na capacidade produtiva e potência do equipamento adotado, a estimativa de consumo energético para obtenção de 1 tonelada de cinzas de algaroba peneiradas é de 1,2 kWh.

3.2.3 Produção do concreto asfáltico

Com base em dados médios mensurados em usinas de concreto asfáltico, o consumo de energia elétrica para seu funcionamento e o consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) para aquecimento do ligante, dos agregados e da mistura são, respectivamente, cerca de 1 kWh e 370 MJ, considerando a produção de 1 tonelada de mistura asfáltica (MASCARENHAS *et al.*, 2023a).

3.2.4 Transporte de materiais

A partir do cenário local (Tabela 6), foram definidos as distâncias e os tipos de veículos considerados no transporte dos materiais (Tabela 10). Foi considerado que o processamento dos resíduos seria realizado na usina.

Tabela 10: Informações relacionadas ao transporte de materiais

Material	Percurso	Distância (km)	Tipo de veículo
Resíduos	Lavanderia a Usina	C1: 10	Caminhão (23 t)
		C2: 30	
		C3: 50	
Agregado natural	Pedreira a Usina	20	Caminhão (23 t)
Ligante asfáltico	Fornecedor de ligante a Usina	150	Caminhão (40 t)

Fonte: A autora (2025).

3.2.5 Dados considerados para o inventário

Para cada fase do ciclo de vida inserida na fronteira do sistema, foram descritos os dados primários a ela vinculados. Os dados primários foram relacionados a dados secundários, advindos da base de dados Ecoinvent 3.9.1 e, caso ausente na base, da literatura. Como a ACV é uma metodologia de estimativa de impactos com base em cenários estruturados, na correlação dos dados primários com os secundários, foram atribuídos provedores com a maior granularidade possível na localização e realizada a validação dos dados. No caso do consumo energético, há uma atribuição à região nordeste, que possui uma matriz energética com elevada influência de fontes renováveis, cenário distinto de outras regiões do país, tendo em vista que esses aspectos impactam diretamente a confiabilidade dos resultados obtidos. Os dados primários e secundários, considerados em cada fase do ciclo de vida, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Dados considerados no inventário do ciclo de vida

Continua

Fase do ciclo de vida	Dado primário	Dado secundário
Extração e processamento de matérias-primas	Quantidade de lodo têxtil, de acordo com cada mistura, e consumo de energia elétrica necessário para o processamento do lodo têxtil	Literatura: Albrecht (2022); Moura (2021); Verdés (2021). Ecoinvent 3.9.1: market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage U - BR-North-eastern grid

Fonte: A autora (2025).
Tabela 11: Dados considerados no inventário do ciclo de vida

		Conclusão
Fase do ciclo de vida	Dado primário	Dado secundário
Extração e processamento de matérias-primas	Quantidade de cinzas de algaroba, de acordo com cada mistura, e consumo de energia elétrica necessário para o processamento das cinzas de algaroba	Literatura: Coppi Industrial (2022); Moura (2017). Ecoinvent 3.9.1: market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage U - BR-North-eastern grid
	Quantidade de agregado natural, de acordo com cada mistura	Ecoinvent 3.9.1: gravel production, crushed gravel, crushed U - BR
	Quantidade de ligante asfáltico, de acordo com cada mistura	Ecoinvent 3.9.1: pitch production, petroleum refinery operation pitch U - BR
Transporte das matérias-primas	Distância de transporte da lavanderia à usina e quantidade de resíduo a ser fornecido	Ecoinvent 3.9.1: transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 U - BR
	Distância de transporte da pedreira à usina e quantidade de agregado natural a ser fornecido	
	Distância de transporte do fornecedor à usina e quantidade de ligante asfáltico a ser fornecido	Ecoinvent 3.9.1: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 U - BR
Produção da mistura asfáltica	Consumo de GLP necessário para aquecimento dos ligantes e agregados	Ecoinvent 3.9.1: heat production, propane, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, other than natural gas U - RoW
	Consumo de eletricidade necessário para funcionamento da usina	Ecoinvent 3.9.1: market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage U - BR-North-eastern grid

Fonte: A autora (2025).

3.2.6 Análise de qualidade dos dados

Para a avaliação da qualidade dos dados utilizados, foi empregado o Ecoinvent Data Quality System, que é baseado em cinco indicadores:

Confiabilidade; Completude; Correlação temporal; Correlação geográfica; e Correlação tecnológica adicional. Na avaliação de cada indicador, são definidos critérios para atribuição de pontuação de A (maior pontuação) a E (menor pontuação), conforme descrito na Tabela 12.

Tabela 12: Indicadores e pontuações de qualidade dos dados

Indicador	Pontuação				
	A	B	C	D	E
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente baseados em suposições ou dados não verificados baseados em medições.	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas.	Estimativa qualificada (por exemplo, por especialista industrial).	Estimativas não qualificadas.
Completude	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado, ao longo de um período adequado para equilibrar as flutuações normais.	Dados representativos de mais de 50% dos locais relevantes para o mercado considerado, ao longo de um período adequado para equilibrar as flutuações normais.	Dados representativos de apenas alguns locais (< 50%) relevantes para o mercado considerado ou mais de 50% dos locais, mas de períodos mais curtos.	Dados representativos de apenas um local relevante para o mercado considerado ou de alguns locais, mas de períodos mais curtos.	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e de períodos mais curtos.
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados.	Menos de 6 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados.	Menos de 10 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados.	Menos de 15 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados.	Idade dos dados desconhecida ou mais de 15 anos de diferença em relação ao período de tempo do conjunto de dados.
Correlação geográfica	Dados da área em estudo.	Dados médios de uma área maior na qual a área em estudo está incluída.	Dados de uma área com condições de produção semelhantes.	Dados de uma área com condições de produção ligeiramente semelhantes.	Dados de uma área desconhecida ou distintamente diferente
Correlação tecnológica adicional	Dados de empresas, processos e materiais em estudo	Dados de processos e materiais em estudo (ou seja, tecnologia idêntica) mas de empresas diferentes.	Dados de processos e materiais em estudo, mas de tecnologia diferente.	Dados sobre processos ou materiais relacionados.	Dados sobre processos relacionados em escala laboratorial ou de tecnologia diferente.

Fonte: A autora (2025).

3.3 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

Para a estruturação dos sistemas a serem avaliados na ACV, foi utilizado o software OpenLCA, gratuito e de código aberto, em sua versão 2.1.1. Diferente de

outros softwares utilizados para realização de ACV, como o GaBi e o SimaPro, o OpenLCA é gratuito, de código aberto e tem maior possibilidade de personalização, aspectos relevantes no contexto de diversos estudos (ABDALLA; FAHEEM; WALTERS, 2022b; KAUR; BILIGIRI, 2025; SANTOLINI *et al.*, 2024; SANTOS *et al.*, 2024; ZHOU *et al.*, 2022). No OpenLCA, foi inserida e manipulada a base de dados Ecoinvent 3.9.1, utilizando sua estrutura de processos, conforme descrito na Tabela 11. Tendo em vista a escassez de estudos de ACV para incorporação de resíduos têxteis em concreto asfáltico, o método de avaliação utilizado foi o ReCiPe 2016, por apresentar categorias que abrangem diversas esferas de impacto, trazendo uma visão mais ampla dos cenários analisados.

O nível de avaliação escolhido foi o *midpoint* (em inglês, ponto médio) e a perspectiva, *Hierarchist* (em inglês, Hierarquista). Enquanto o nível *endpoint* (em inglês, ponto final) compreende as consequências finais dos impactos, o *midpoint* tem foco nos aspectos específicos entre a extração de recursos e o impacto final. A perspectiva hierarquista (H) é amplamente utilizada por trazer um equilíbrio entre os impactos de curto e longo prazo, alinhando o consenso científico e as principais políticas públicas.

As categorias de impacto avaliadas no nível de ponto médio no método ReCiPe 2016 são: Acidificação terrestre; Aquecimento global; Consumo de água; Depleção de ozônio estratosférico; Ecotoxicidade de água doce; Ecotoxicidade marinha; Ecotoxicidade terrestre; Escassez de recursos fósseis; Escassez de recursos minerais; Eutrofização de água doce; Eutrofização marinha; Formação de material particulado fino; Formação de ozônio, ecossistemas terrestres; Formação de ozônio, saúde humana; Radiação ionizante; Toxicidade cancerígena para humanos; Toxicidade não cancerígena para humanos; e Uso do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do objetivo e escopo definidos (seção 3.1), com base no inventário descrito (seção 3.2) e detalhamento do método (seção 3.2.6), foram mensurados os impactos do ciclo de vida para as 18 categorias de impacto descritas. Na Tabela 13, é apresentada uma visão geral dos resultados, descrevendo o processo com maior contribuição, bem como os sistemas com melhor e pior desempenhos. Foi utilizada uma notação de setas para demonstrar a variação observada em relação à REF (redução - ↓ e aumento - ↑) e as variações acima de 1,5% foram destacadas.

Tabela 13: Visão geral da AICV

Categoria de impacto	Maior contribuição		Melhor desempenho		Pior desempenho	
	Processo	Contribuição (%)	Sistema	Variação em relação a REF	Sistema	Variação em relação a REF
Acidificação terrestre	Produção do agregado natural	42,9%	C1_4CA	↓ 1,9%	REF	N/A
Aquecimento global	Produção da mistura asfáltica	46,0%	C1_4CA	↓ 0,4%	REF	N/A
Consumo de água	Produção do ligante asfáltico	65,9%	C1_4CA	↓ 0,4%	C3_3LT	↑ 6,9%
Depleção de ozônio estratosférico	Produção do agregado natural	48,8%	C1_4CA	↓ 2,2%	REF	N/A
Ecotoxicidade de água doce	Produção da mistura asfáltica	43,9%	C1_4CA	↓ 0,9%	C3_3LT	↑ 3,7%
Ecotoxicidade marinha	Produção do ligante asfáltico	40,0%	C1_4CA	↓ 0,7%	C3_3LT	↑ 2,7%
Ecotoxicidade terrestre	Transporte das matérias-primas	35,8%	C1_4CA	↓ 0,9%	C3_3LT	↑ 0,2%
Escassez de recursos fósseis	Produção do ligante asfáltico	82,0%	C1_4CA	↓ 0,1%	REF	N/A
Escassez de recursos minerais	Produção do ligante asfáltico	46,1%	C1_4CA	↓ 0,9%	REF	N/A
Eutrofização de água doce	Produção da mistura asfáltica	85,3%	C3_4CA	↓ 1,4%	C3_3LT	↑ 0,4%
Eutrofização marinha	Produção do ligante asfáltico	88,5%	C1_4CA	↓ 0,2%	REF	N/A
Formação de material particulado fino	Produção do ligante asfáltico	37,9%	C1_4CA	↓ 1,5%	REF	N/A

↓ Redução do impacto mensurado | ↑ Aumento do impacto mensurado
Fonte: A autora (2025).

Tabela 13: Visão geral da AICV

Categoria de impacto	Maior contribuição		Melhor desempenho		Pior desempenho		Conclusão
	Processo	Contribuição (%)	Sistema	Varição em relação a REF	Sistema	Varição em relação a REF	
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	Produção do agregado natural	47,0%	C1_4CA	↓ 2,1%	REF	N/A	
Formação de ozônio, saúde humana	Produção do agregado natural	50,6%	C1_4CA	↓ 2,3%	REF	N/A	
Radiação ionizante	Produção da mistura asfáltica	41,7%	C1_4CA	↓ 0,9%	C3_3LT	↑ 27,9%	
Toxicidade cancerígena para humanos	Produção da mistura asfáltica	55,6%	C1_4CA	↓ 1,4%	C3_3LT	↑ 0,7%	
Toxicidade não cancerígena para humanos	Produção da mistura asfáltica	48,0%	C1_4CA	↓ 0,8%	C3_3LT	↑ 0,3%	
Uso do solo	Produção da mistura asfáltica	50,0%	C1_4CA	↓ 1,2%	C3_3LT	↑ 2,5%	
↓ Redução do impacto mensurado ↑ Aumento do impacto mensurado							
Fonte: A autora (2025).							

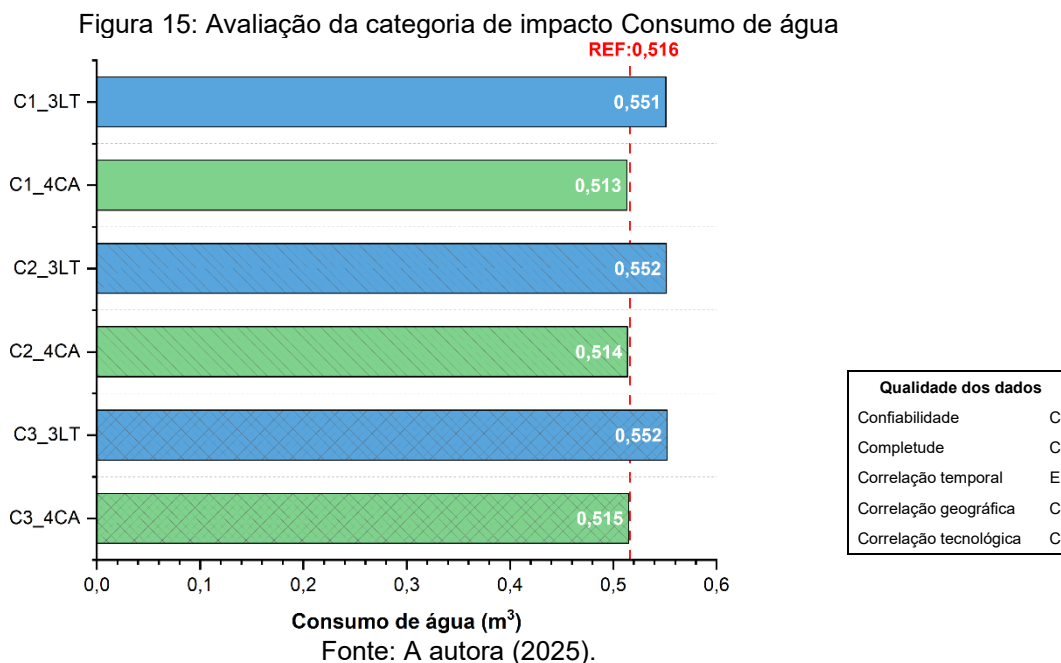
Ao analisar os resultados obtidos, observa-se que os sistemas contendo cinzas de algaroba tiveram os menores impactos estimados, principalmente o sistema C1_4CA, em 17 das 18 categorias avaliadas. A substituição dos agregados naturais pelo resíduo promoveu a redução de até 2,3% do impacto mensurado por meio da ACV, ao comparado com o sistema de referência. Já os sistemas contendo lodo têxtil, apresentaram o maior valor de impacto em metade das categorias estudadas, ocasionando o aumento de até 27,7% do valor calculado. Em relação às contribuições dos processos, a produção da mistura asfáltica apresentou o maior percentual em 7 categorias; a produção do ligante asfáltico, em 6; a produção do agregado natural, em 4; e o transporte das matérias-primas, em 1. Os valores de entrada para os processos de produção do ligante e da mistura asfáltica não variam entre os sistemas avaliados.

Assim, de modo geral, três aspectos influenciaram nos resultados observados: o consumo energético necessário para processamento do lodo têxtil, cerca de 18 vezes superior ao das cinzas de algaroba; a substituição dos agregados naturais pelas cinzas de algaroba, nas categoriais nas quais o processo com maior contribuição é a produção do agregado natural; e a predominância de contribuição da produção dos recursos fósseis utilizados.

Na apresentação dos impactos estimados por categoria de impacto por sistema avaliado, o de referência (REF), sem incorporação de resíduos, é destacado na linha tracejada em vermelho, para facilitar a comparação visual; os que possuem lodo têxtil (3LT) são apresentados nas barras azuis; e os que possuem cinzas de algaroba (4CA), nas barras verdes. Há três padrões sobrepostos às barras que distinguem os cenários C1, C2 e C3. De modo a possibilitar a visão da qualidade dos dados utilizados na modelagem do resultado da categoria, é apresentado um quadro com as pontuações nos 5 indicadores avaliados. Em outro gráfico, são apresentados os percentuais de contribuição dos processos por categoria e sistema avaliados. Foram considerados os percentuais referentes a cada mistura para os diferentes cenários, pois as variações não são significativas.

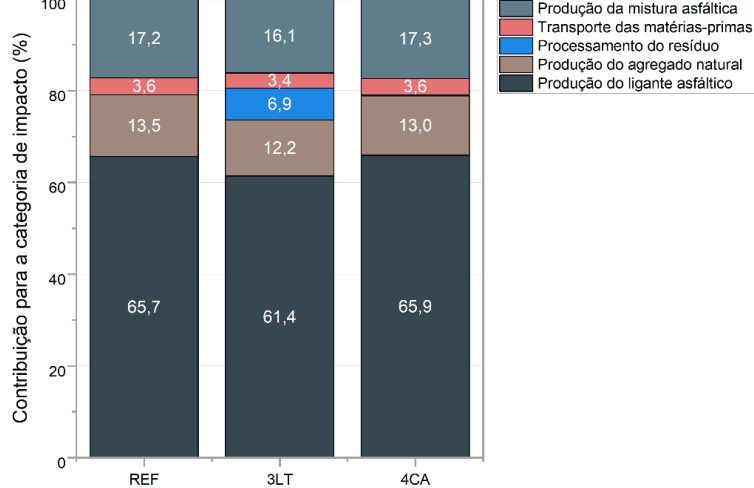
4.1 CONSUMO ENERGÉTICO NO PROCESSAMENTO DO LODO TÊXTIL

Na Figura 15, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Consumo de água.



Nessa categoria (Figura 15), os sistemas de 3LT apresentaram os maiores resultados, superando inclusive a REF. Na Figura 16, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 16: Contribuição dos processos na categoria de impacto Consumo de água

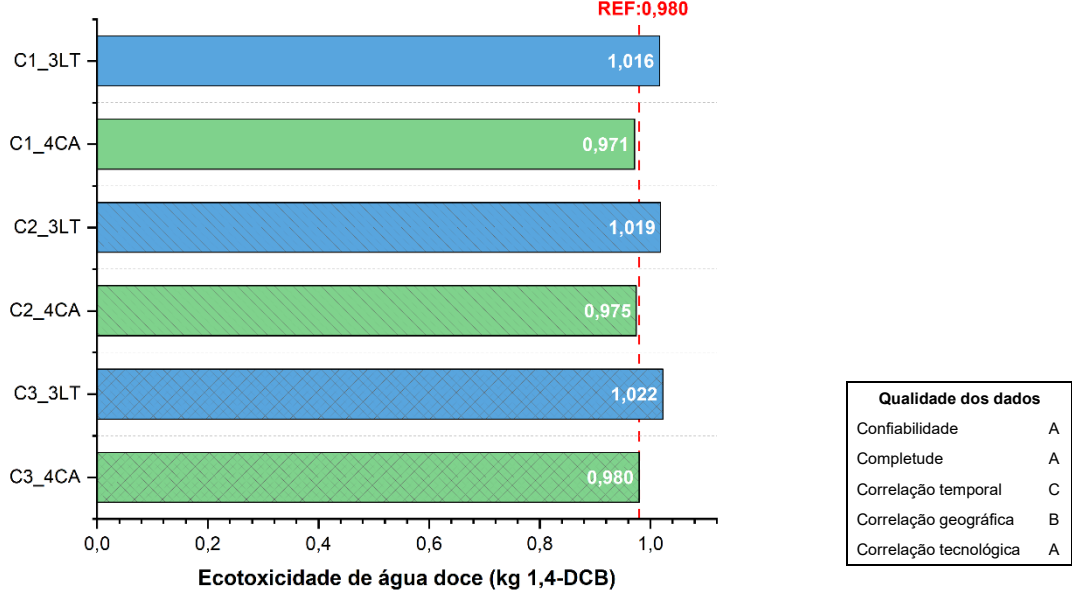


Fonte: A autora (2025).

É possível observar que o principal processo a contribuir foi a produção do ligante asfáltico (Figura 16), seguido da produção da mistura asfáltica, ambos constantes em todos os sistemas. Ao comparar os sistemas alternativos, a contribuição do processamento do lodo têxtil se destaca.

Na Figura 17, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Ecotoxicidade de água doce.

Figura 17: Avaliação da categoria de impacto Ecotoxicidade de água doce

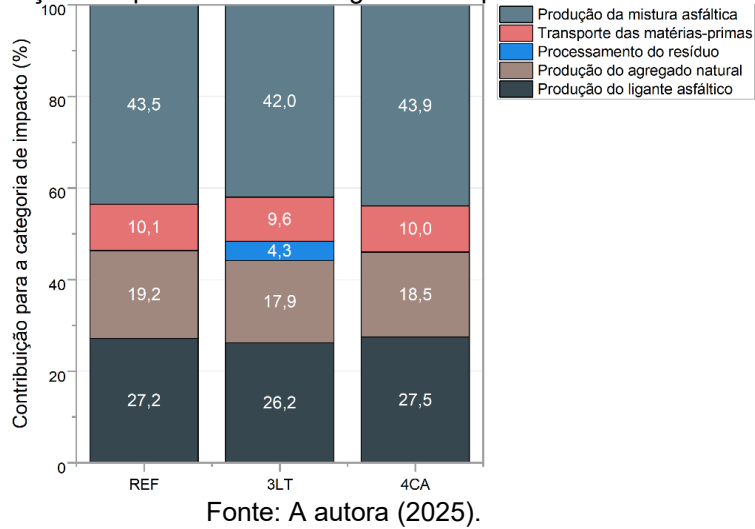


Fonte: A autora (2025).

De modo semelhante ao observado na categoria anterior, os sistemas contendo lodo têxtil demonstraram os maiores valores de impacto (Figura 17). Na

Figura 18, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

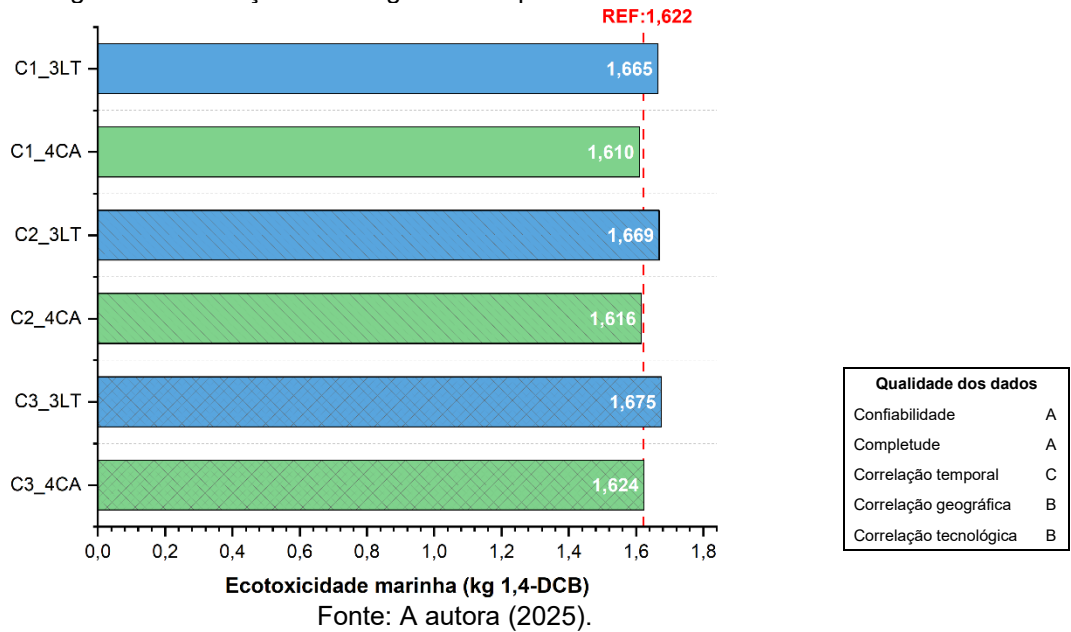
Figura 18: Contribuição dos processos na categoria de impacto Ecotoxicidade de água doce



As contribuições (Figura 18) foram majoritariamente relacionadas à produção da mistura asfáltica e do ligante asfáltico, também foi possível observar o percentual referente ao pré-tratamento do lodo têxtil.

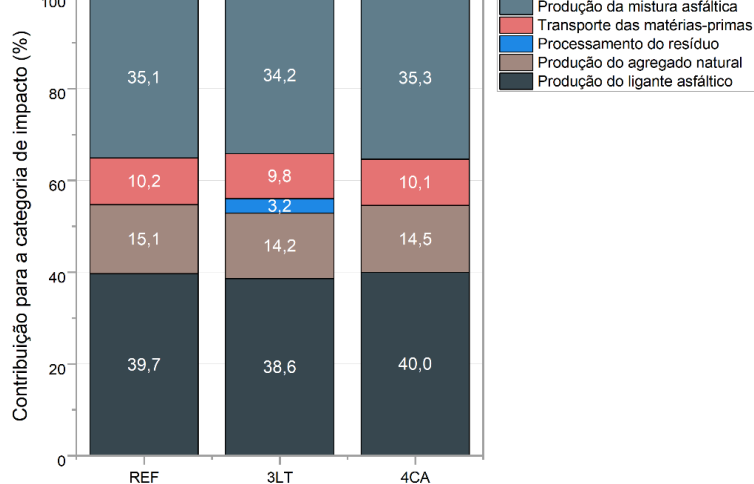
Na Figura 19, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Ecotoxicidade marinha.

Figura 19: Avaliação da categoria de impacto Ecotoxicidade marinha



É observado que os sistemas de 3LT apresentaram os maiores valores de impacto (Figura 19). Na Figura 20, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

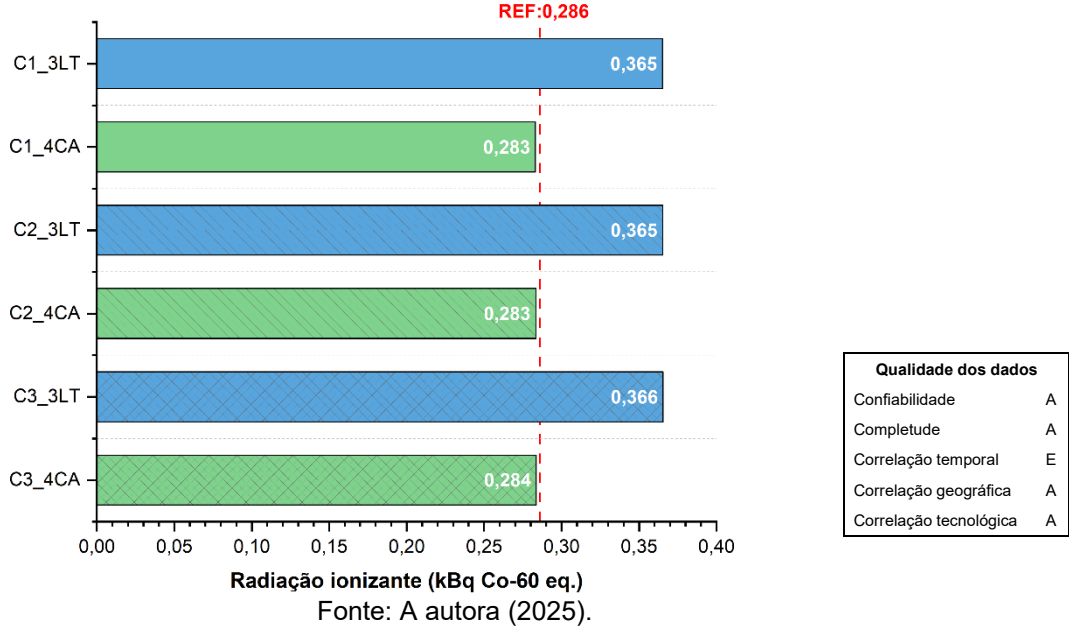
Figura 20: Contribuição dos processos na categoria de impacto Ecotoxicidade marinha



De modo semelhante ao observado nas categorias anteriores, as principais contribuições estão relacionadas aos processos de produção do ligante e da mistura asfáltica (Figura 20).

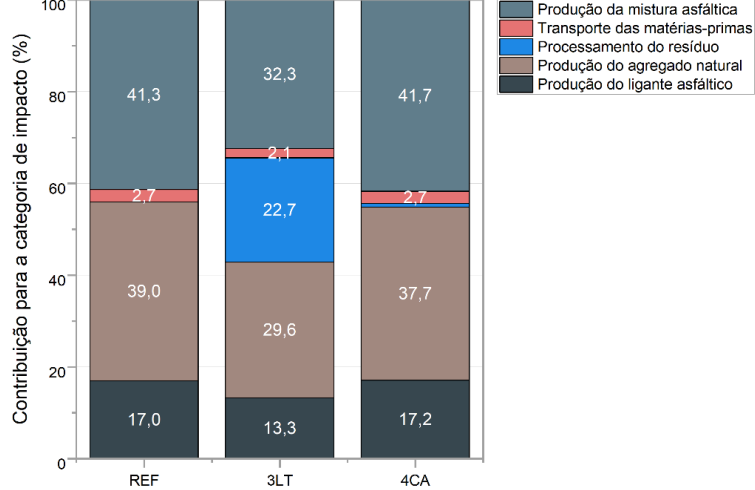
Na Figura 21, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Radiação ionizante.

Figura 21: Avaliação da categoria de impacto Radiação ionizante



Os impactos mensurados para os sistemas 3LT foram os mais elevados, superando em torno de 28% o REF (Figura 21), percentual alto ao comparado com o observado nas demais categorias (até 7%). Na Figura 22, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 22: Contribuição dos processos na categoria de impacto Radiação ionizante

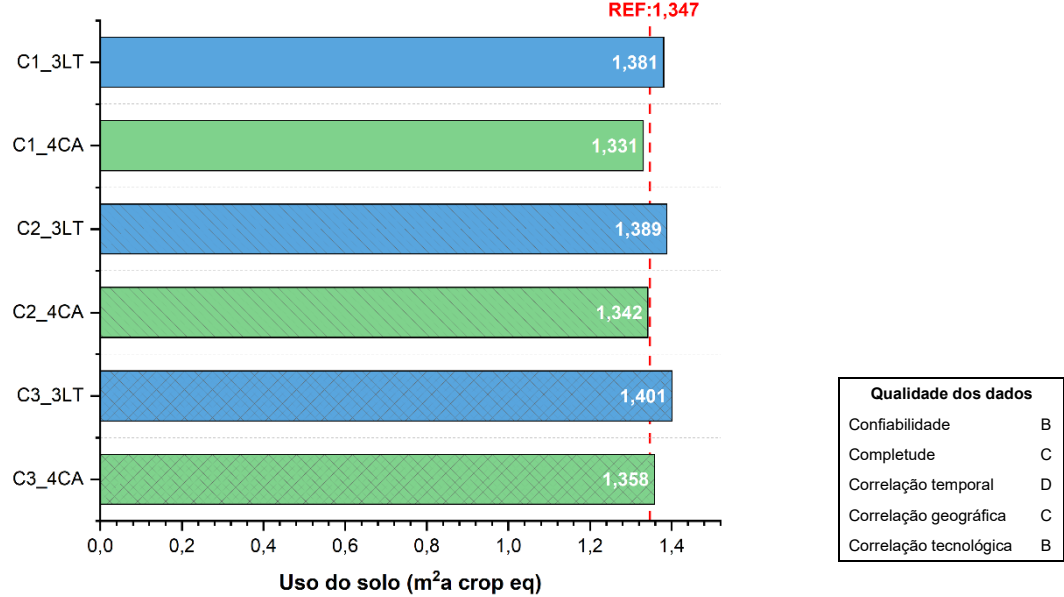


Fonte: A autora (2025).

O processamento do lodo têxtil apresentou o valor mais representativo dentre todas as categorias avaliadas (Figura 22).

Na Figura 23, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Uso do solo.

Figura 23: Avaliação da categoria de impacto Uso do solo

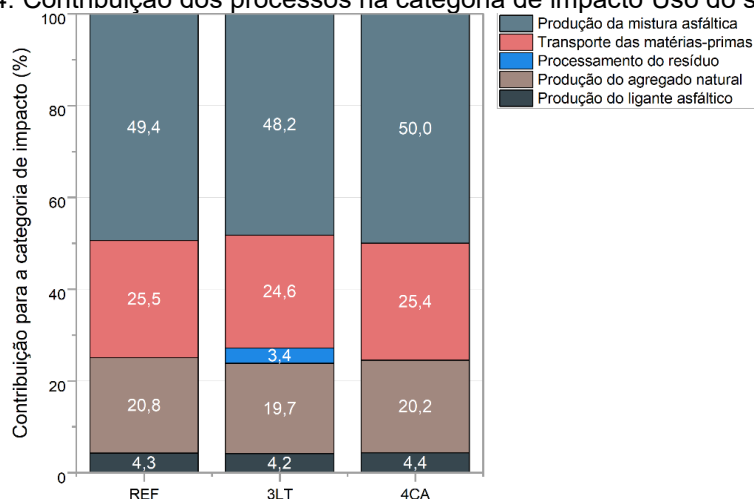


Uso do solo (m²a crop eq)
Fonte: A autora (2025).

Os sistemas contendo lodo têxtil apresentaram os maiores resultados dentre os sistemas avaliados (Figura 23).

Na Figura 24, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 24: Contribuição dos processos na categoria de impacto Uso do solo



Fonte: A autora (2025).

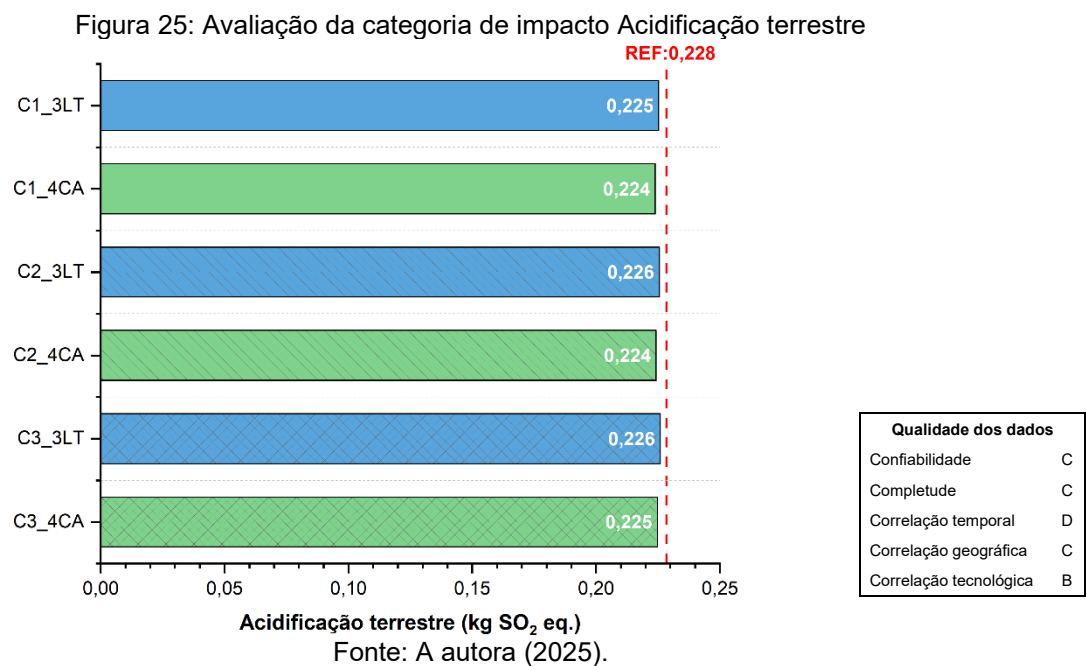
Como detalhado na seção 3.2, o processamento dos resíduos foi expresso em termos do consumo energético necessário para realizar seus respectivos pré-tratamentos. Para o lodo têxtil, é necessária a realização de etapas de secagem e moagem (22,4 kWh/t), que demandam cerca de 18 vezes mais energia que o peneiramento (1,2 kWh/t) necessário para as cinzas de algaroba. Nas categorias apresentadas (Consumo de água, Ecotoxicidade de água doce, Ecotoxicidade marinha, Radiação ionizante e Uso do solo), os processos necessários para produção energética necessária para processamento do teor de lodo têxtil utilizado geram impactos que superam os benefícios relacionados à redução do teor de agregado natural. Devido à diversidade da matriz energética brasileira, diferentes tipos de usina foram responsáveis pelos impactos observados nas categorias, sendo: hidrelétrica, para a categoria Consumo de água; hidrelétrica, Ecotoxicidade de água doce; eólica, Ecotoxicidade marinha; nuclear, Radiação ionizante; e eólica, Uso do solo.

Em um estudo de ACV para materiais alternativos no Brasil, ocorreu comportamento semelhante, parte do processamento de fibras vegetais foi expresso por meio do consumo de eletricidade, impactando no consumo de água (BATISTA DOS SANTOS *et al.*, 2022). Apesar disso, em todas as categorias analisadas, os

principais processos a contribuir foram a produção da mistura asfáltica e do ligante asfáltico. Também foi observado aumento diretamente relacionado às distâncias de transporte dos resíduos (C2 e C3).

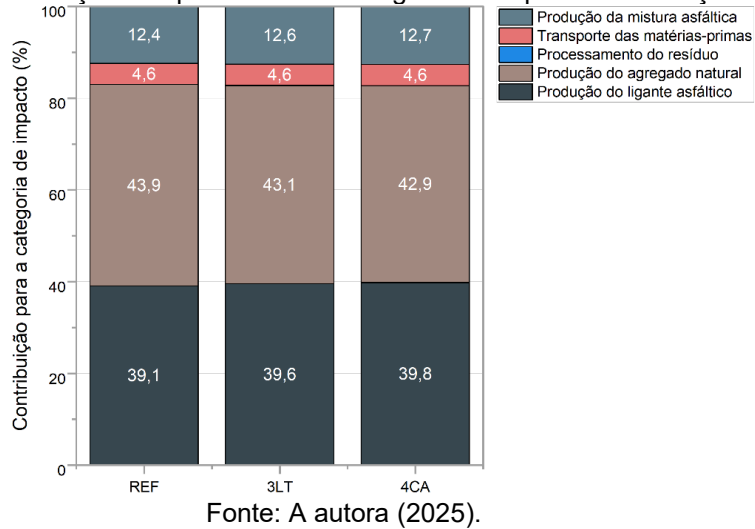
4.2 SUBSTITUIÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS POR RESÍDUOS TÊXTEIS

Na Figura 25, são apresentados os valores mensurados do impacto referente a cada sistema avaliado para a categoria de impacto Acidificação terrestre.



Como é possível observar na Figura 25, há pouca variação entre os sistemas avaliados, com todas as misturas alternativas apresentando valores abaixo do sistema de referência, sem incorporação de resíduos. A redução de impacto observada nos sistemas alternativos em relação à referência na avaliação está relacionada, principalmente, ao menor teor de agregados naturais, tendo em vista que seu processo produtivo contribui em cerca de 43% para os resultados mensurados. Na Figura 26, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

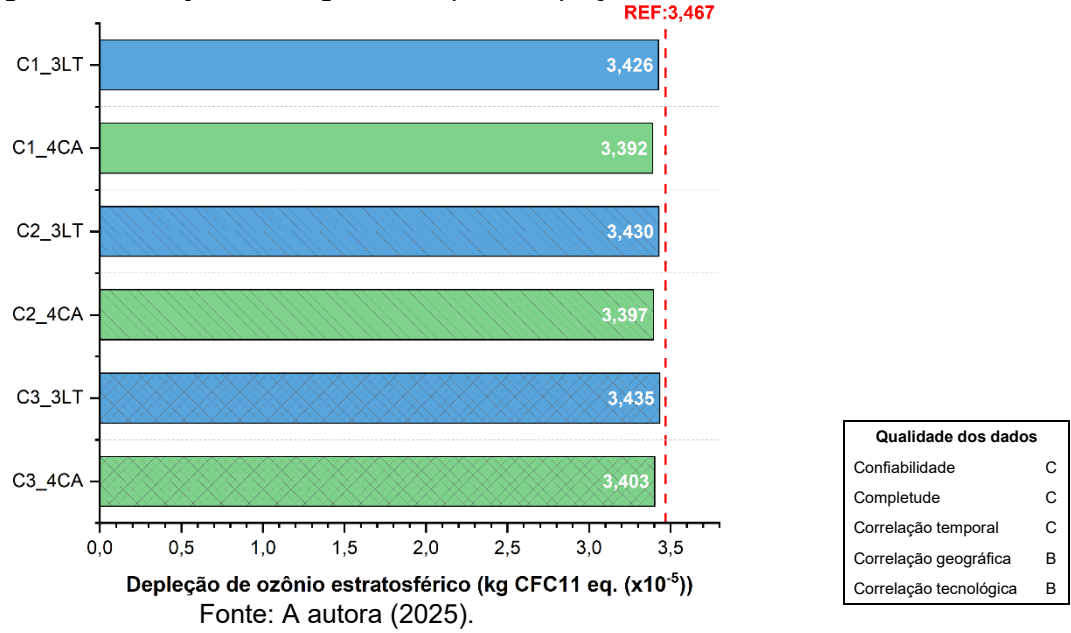
Figura 26: Contribuição dos processos na categoria de impacto Acidificação terrestre



Ao avaliar a contribuição de cada processo (Figura 26), verifica-se que o percentual relacionado ao processamento dos resíduos é inferior a 1% para ambos os sistemas alternativos, 3LT e 4CA. Os outros processos que contribuíram de forma significativa para a categoria foram a produção do ligante asfáltico e a produção da mistura asfáltica, semelhante ao observado por outros autores (ABDALLA; FAHEEM; WALTERS, 2022; KHATER *et al.*, 2021; YUE *et al.*, 2022).

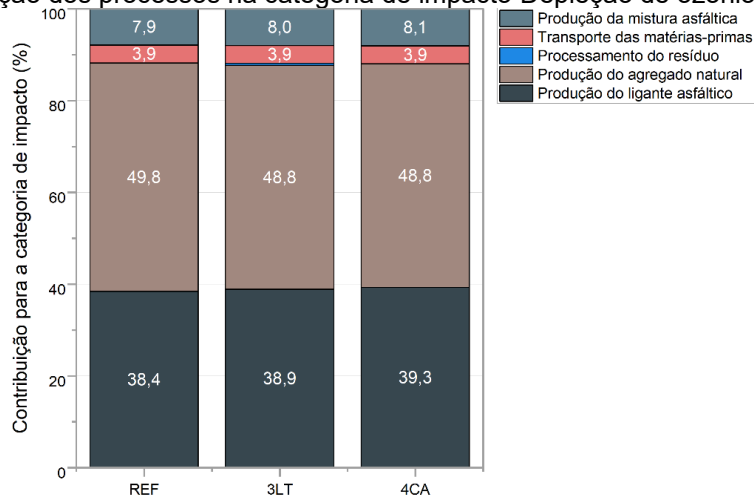
Na Figura 27, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Depleção de ozônio estratosférico.

Figura 27: Avaliação da categoria de impacto Depleção de ozônio estratosférico



Conforme pode ser visualizado na Figura 27, todos os sistemas alternativos apresentam valores inferiores à referência para a categoria. Na Figura 28, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 28: Contribuição dos processos na categoria de impacto Depleção de ozônio estratosférico

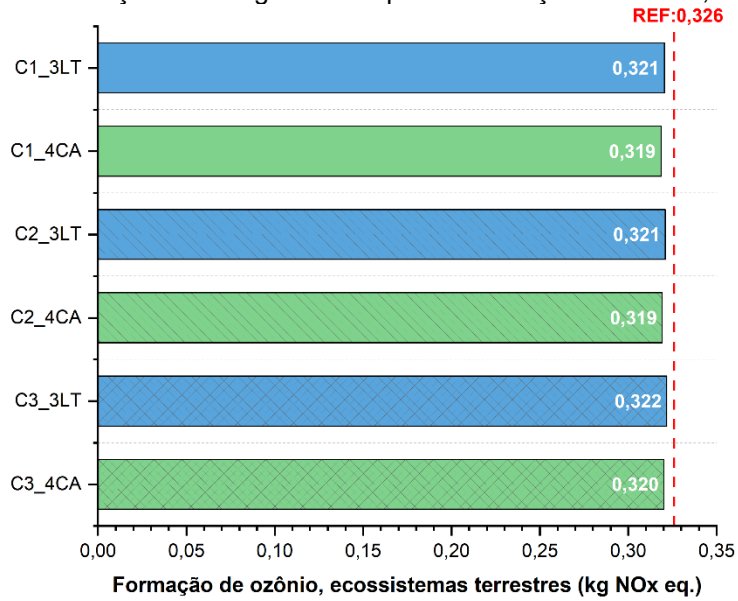


Fonte: A autora (2025).

Os processos que contribuem principalmente são a produção do agregado natural e do ligante asfáltico (Figura 28).

Na Figura 29, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Formação de ozônio, ecossistemas terrestres.

Figura 29: Avaliação da categoria de impacto Formação de ozônio, ecossistemas terrestres

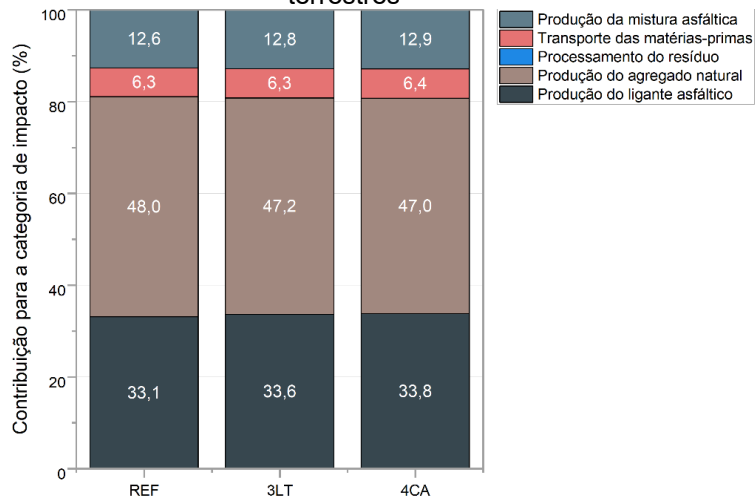


Fonte: A autora (2025).

Qualidade dos dados	
Confiabilidade	C
Compleitude	D
Correlação temporal	D
Correlação geográfica	C
Correlação tecnológica	B

Na Figura 30, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

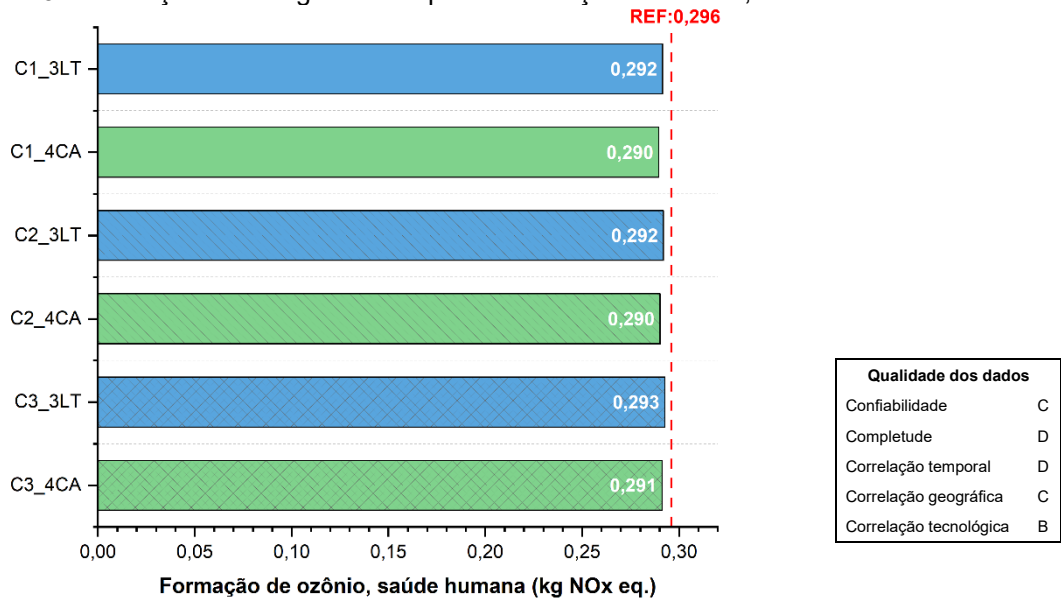
Figura 30: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de ozônio, ecossistemas terrestres



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 31, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Formação de ozônio, saúde humana.

Figura 31: Avaliação da categoria de impacto Formação de ozônio, saúde humana

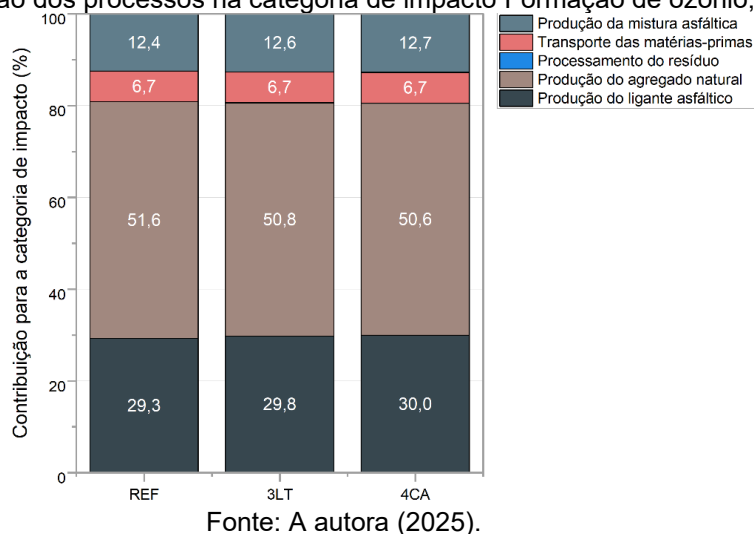


Qualidade dos dados	
Confiabilidade	C
Compleitude	D
Correlação temporal	D
Correlação geográfica	C
Correlação tecnológica	B

Fonte: A autora (2025).

Na Figura 32, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 32: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de ozônio, saúde humana



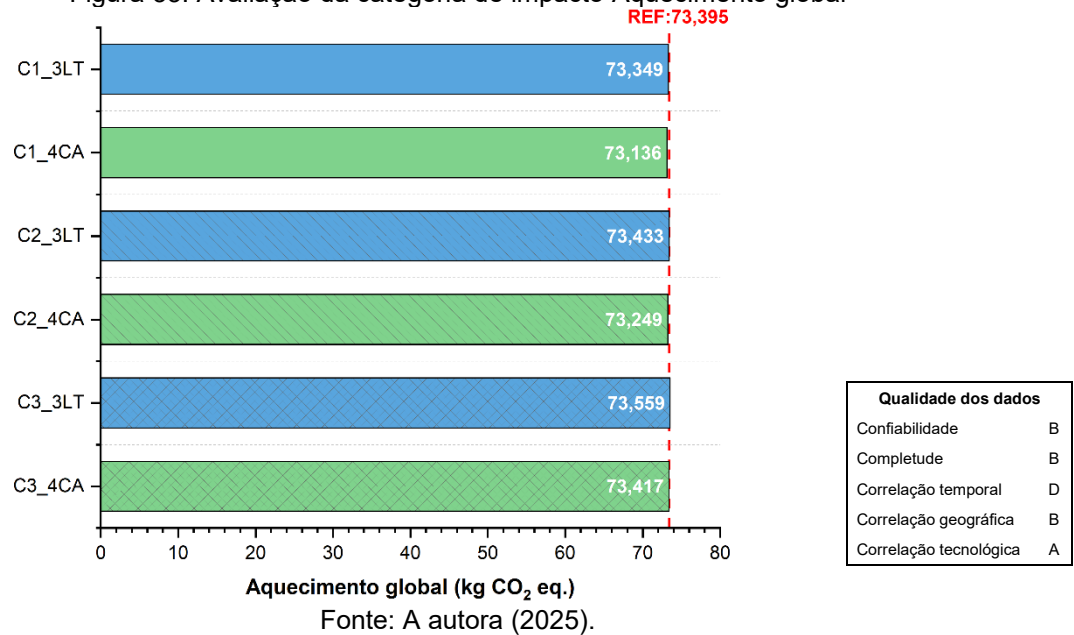
Semelhante ao observado para a Depleção de ozônio, nas duas categorias relacionadas à Formação de ozônio, as maiores contribuições são da produção do agregado natural e do ligante asfáltico (Figura 30 e Figura 32) e, por isso, existiu pouca variação entre os sistemas avaliados (Figura 29 e Figura 31). Os sistemas alternativos apresentaram os menores impactos pelo menor teor de agregados naturais. A extração de agregados é realizada utilizando explosivos a base de nitrato de amônio, produzido predominantemente com energia proveniente de combustíveis fósseis (CANTARELLA; NOGUEIRA; MARQUES, 2023). (CANTARELLA; NOGUEIRA; MARQUES, 2023). Como mencionado, na fabricação de explosivos utilizados para extração dos agregados há liberação de NOx.

De forma geral, em todas as categorias a redução dos impactos não superou 2,3% e, ao considerar que na estimativa dos impactos existem incertezas associadas, a expressividade desse percentual de variação pode se tornar irrelevante. Essas incertezas são demonstradas pela avaliação da qualidade dos dados, que apresentaram valores diversos, entre “A” e “E”, porém majoritariamente “C”. No contexto do Brasil, pela ausência de dados atualizados e adequados para a realidade local, é necessário realizar considerações ao longo do estudo (MASCARENHAS *et al.*, 2023b), o que impacta na precisão dos resultados obtidos.

4.3 PREDOMINÂNCIA DE CONTRIBUIÇÃO DOS RECURSOS FÓSSEIS

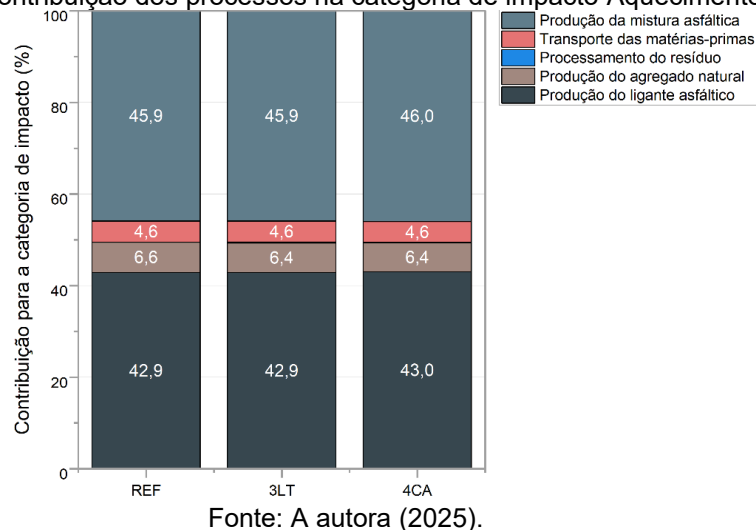
Na Figura 33, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Aquecimento global.

Figura 33: Avaliação da categoria de impacto Aquecimento global



Existem pequenas variações para a quantidade de CO₂ nos impactos mensurados (Figura 33) o que é justificado pelos percentuais de contribuição de cada processo (Figura 34).

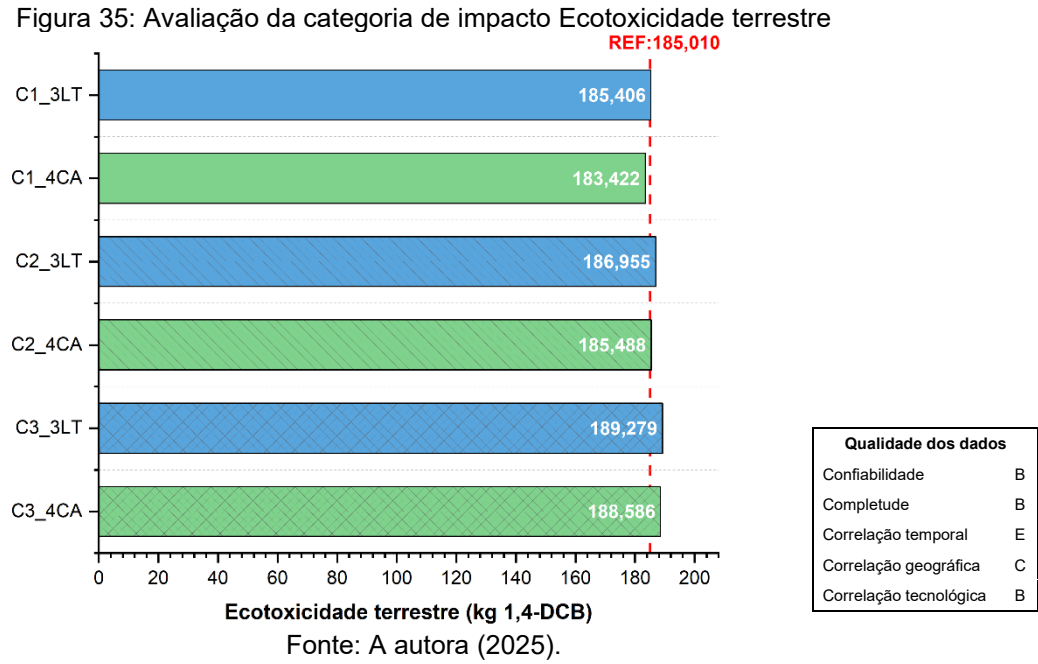
Figura 34: Contribuição dos processos na categoria de impacto Aquecimento global



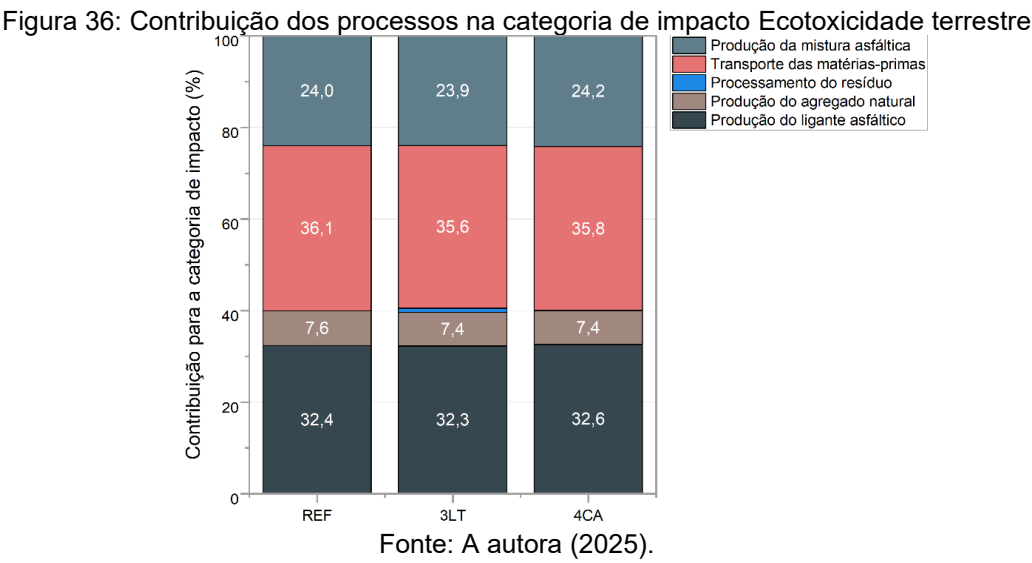
As principais contribuições estão relacionadas às produções da mistura asfáltica e do ligante asfáltico (Figura 34), o que foi também observado por outros autores (ABDALLA; FAHEEM; WALTERS, 2022; KHATER *et al.*, 2021; MASCARENHAS *et al.*, 2023a; YUE *et al.*, 2022). Existe pouca variação dos impactos entre os sistemas, pois para os processos com maior contribuição os valores de entrada são os mesmos. O GLP, utilizado para aquecimento na etapa de

produção da mistura, e o CAP são derivados do petróleo e seus processos de extração e refino, bem como sua queima são responsáveis pela emissão de GEE (KHATER *et al.*, 2021).

Na Figura 35, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Ecotoxicidade terrestre.



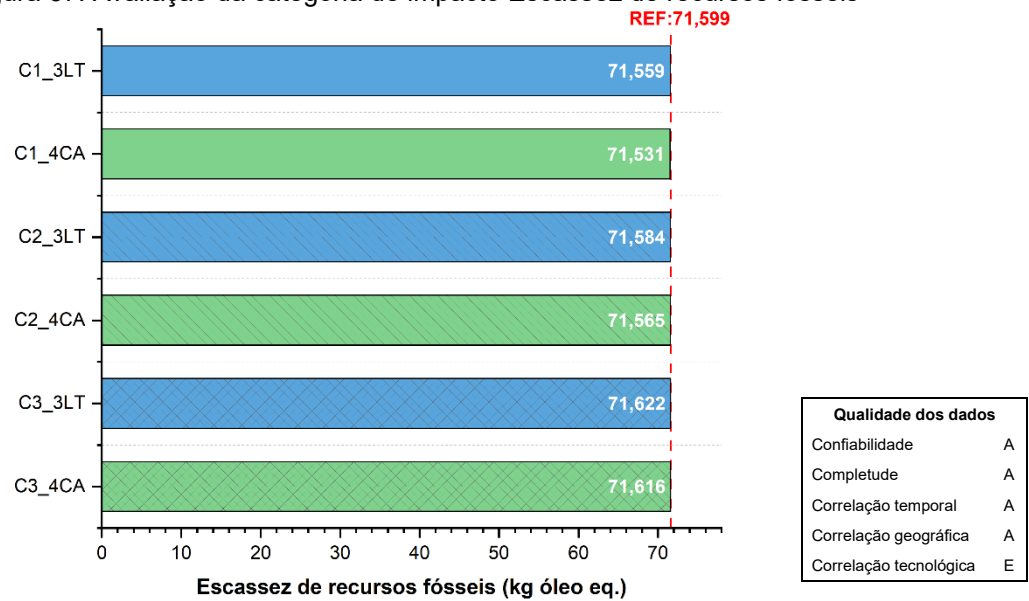
Na Figura 36, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.



Os sistemas nos cenários C2 e C3 apresentaram resultados maiores que a referência (Figura 35) e a contribuição do transporte representou cerca de 36% (Figura 36). A predominância do transporte nessa categoria também foi observada por outros autores (YUE *et al.*, 2022).

Na Figura 37, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Escassez de recursos fósseis.

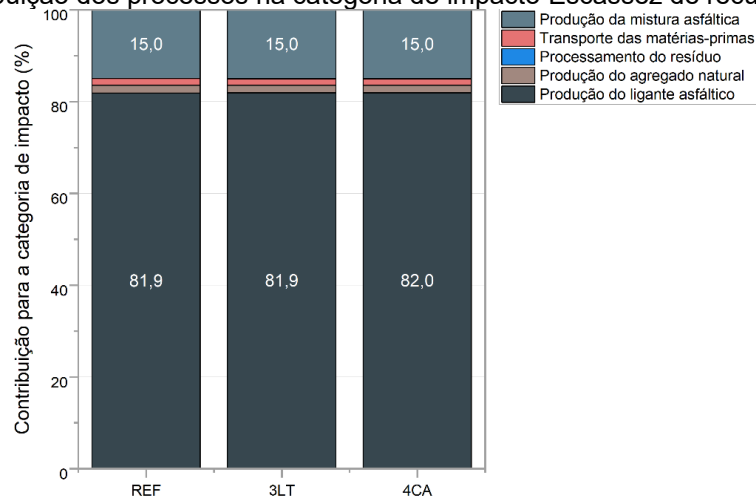
Figura 37: Avaliação da categoria de impacto Escassez de recursos fósseis



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 38, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 38: Contribuição dos processos na categoria de impacto Escassez de recursos fósseis

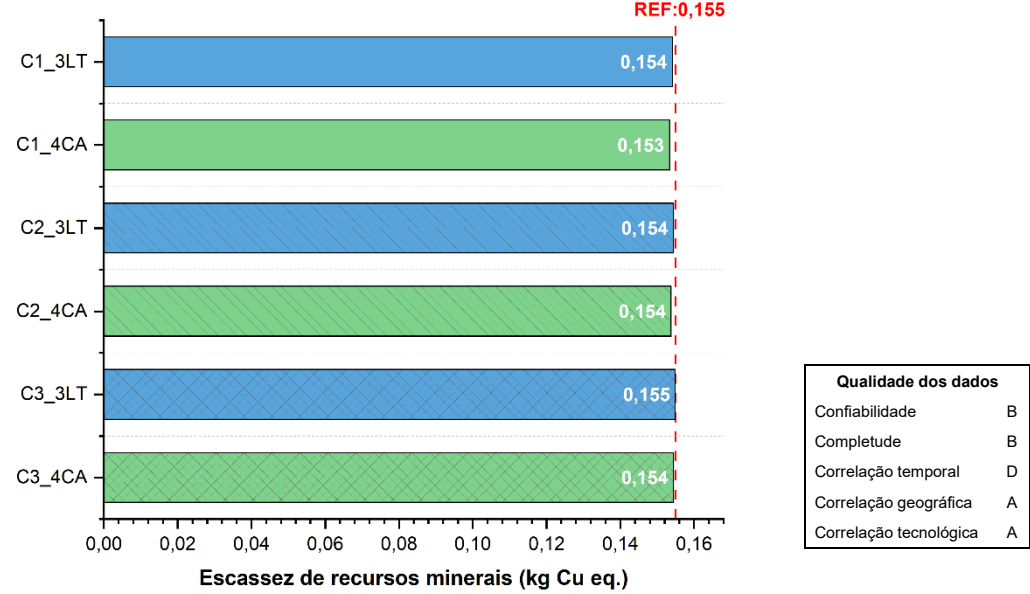


Fonte: A autora (2025).

As variações entre os resultados obtidos foram mínimas (Figura 37), pois cerca de 97% das contribuições (Figura 38) para a categoria estão relacionadas à produção do ligante asfáltico e da mistura asfáltica, também foi descrita uma predominância desse processo nessa categoria por Oreto *et al.* (2021).

Na Figura 39, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Escassez de recursos minerais.

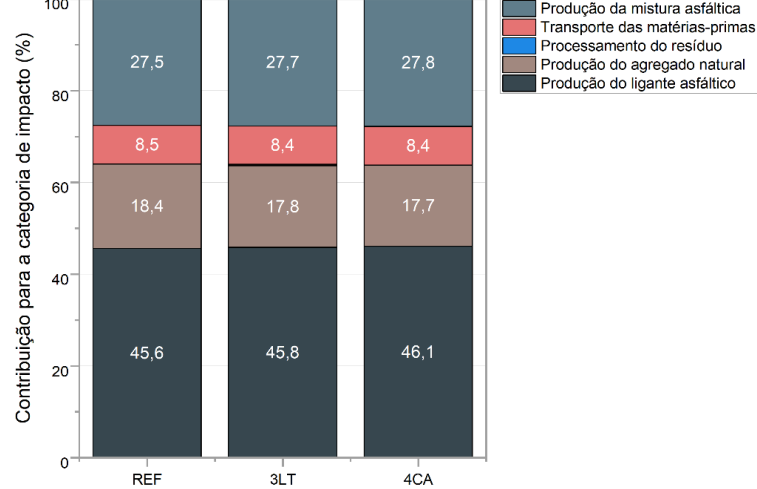
Figura 39: Avaliação da categoria de impacto Escassez de recursos minerais



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 40, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

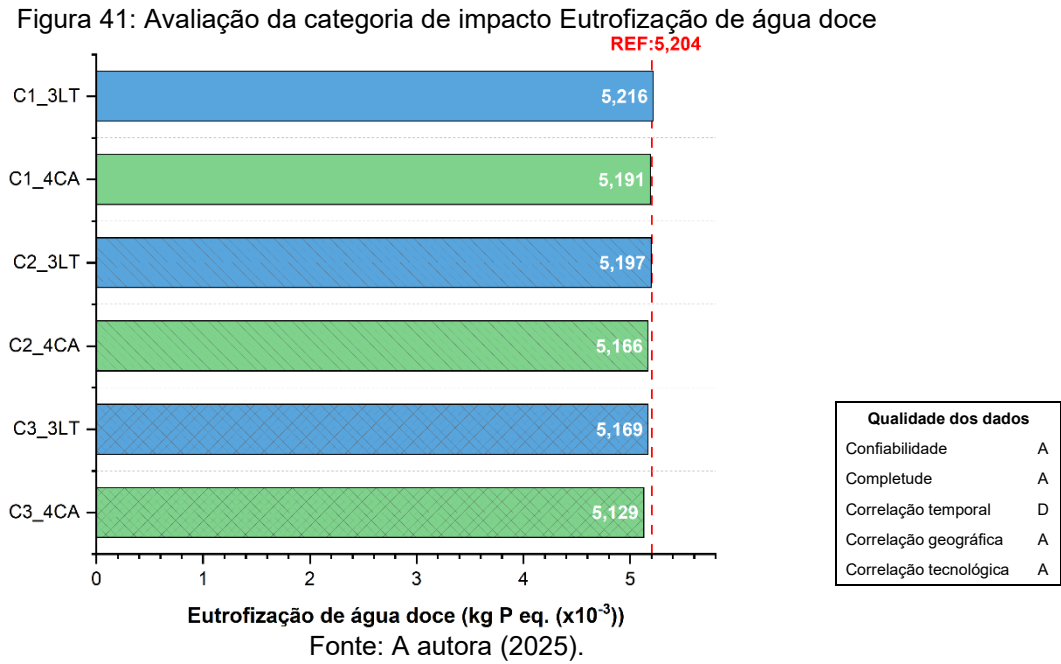
Figura 40: Contribuição dos processos na categoria de impacto Escassez de recursos minerais



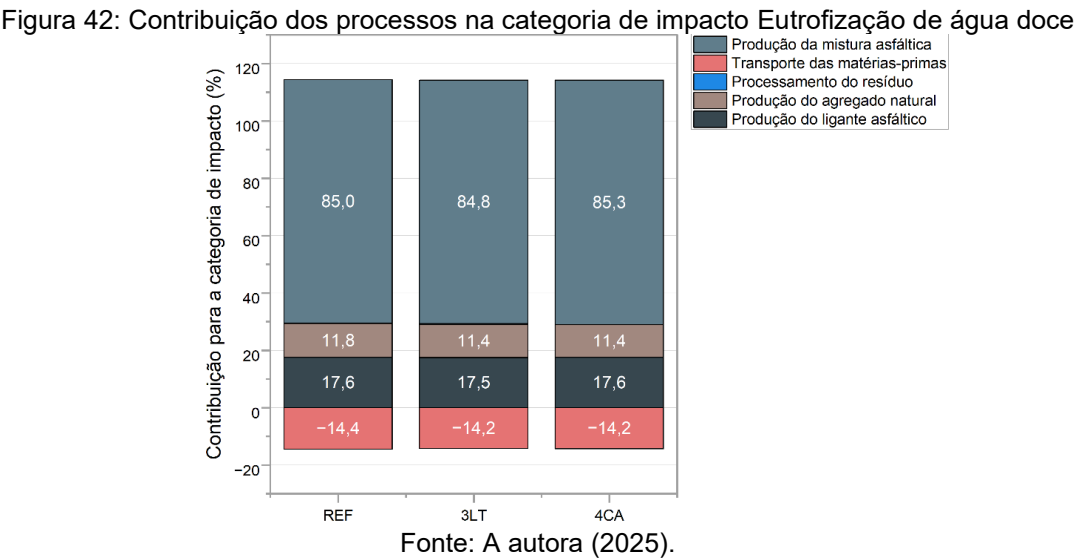
Fonte: A autora (2025).

Para essa categoria, também são pequenas as variações entre os resultados obtidos (Figura 39), pois há uma correlação direta com os recursos virgens utilizados. Dessa forma, as principais contribuições foram relacionadas à produção do ligante e da mistura asfáltica (Figura 40).

Na Figura 41, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Eutrofização de água doce.

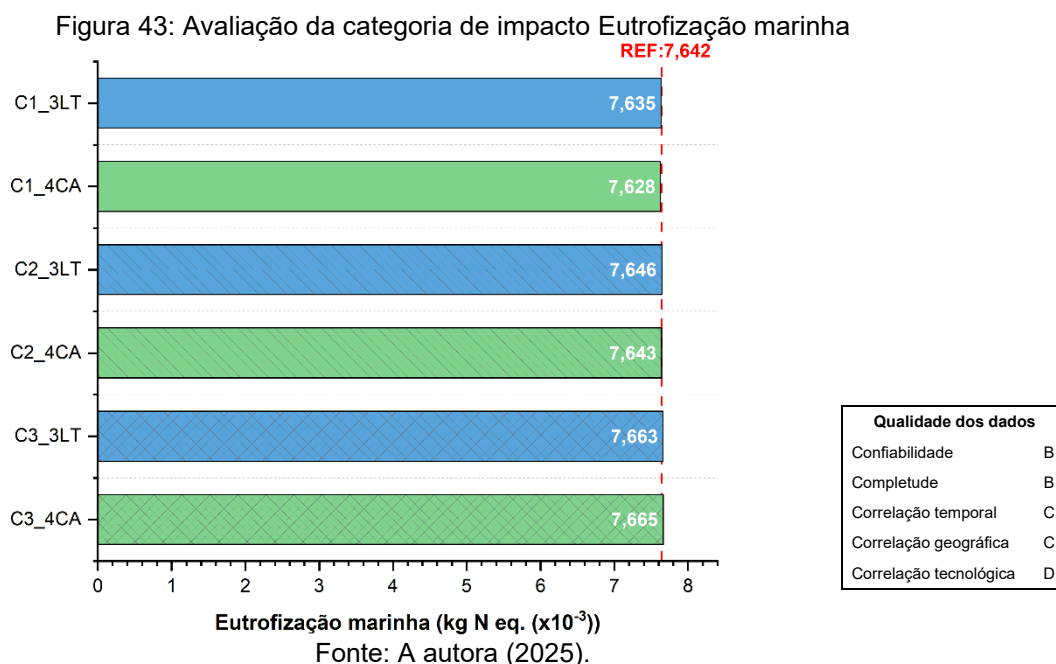


Na Figura 42, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.



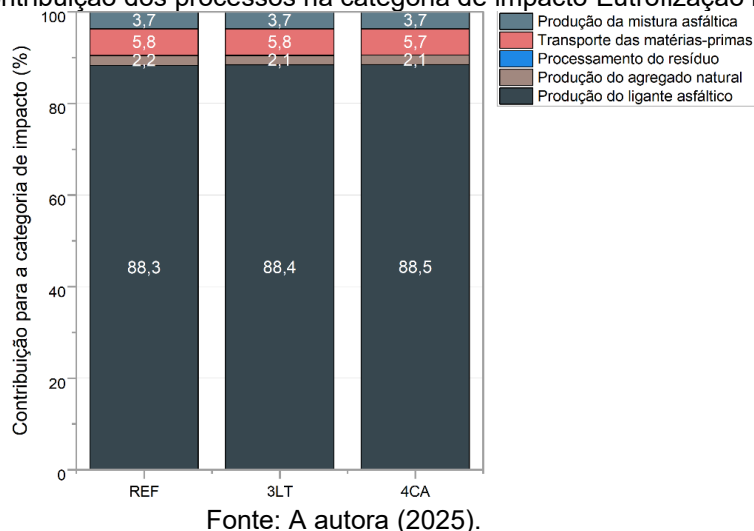
Os principais processos a contribuírem foram a produção da mistura asfáltica e do ligante asfáltico, porém foi observada uma contribuição negativa do transporte (Figura 42). Na avaliação da contribuição, esse comportamento está relacionado à produção de biodiesel, o que também foi observado por (MAHABIR *et al.*, 2021).

Na Figura 43, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Eutrofização marinha.



Os resultados para a categoria apresentam poucas variações entre os sistemas (Figura 43). Na Figura 44, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

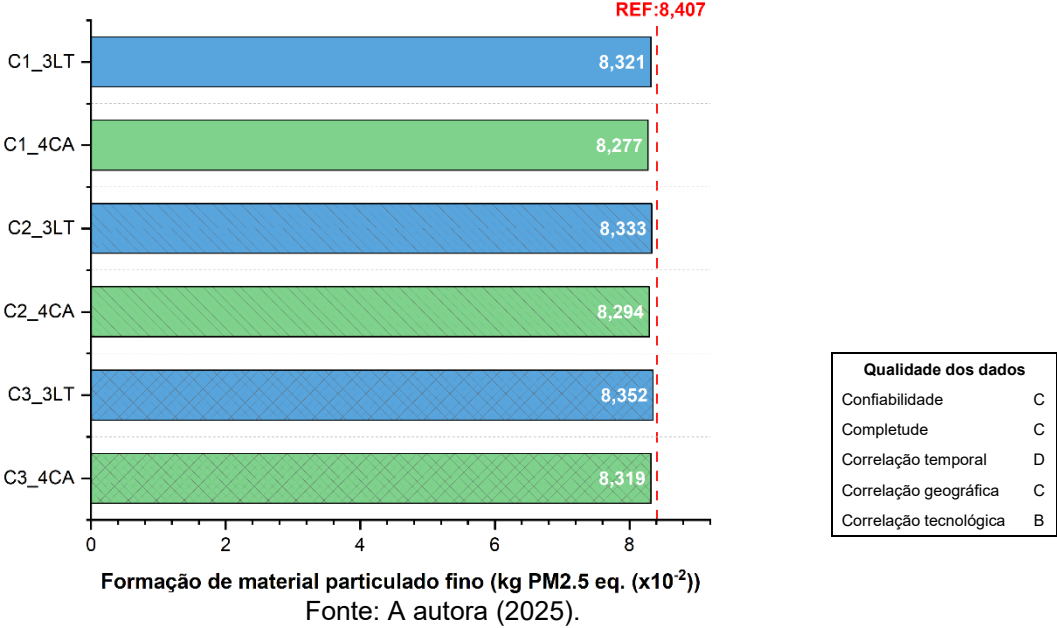
Figura 44: Contribuição dos processos na categoria de impacto Eutrofização marinha



A produção do ligante contribuiu cerca de 88% (Figura 44), o que está correlacionado a extração de petróleo no Brasil, que se dá predominantemente em alto mar (90% da produção nacional) (AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2024).

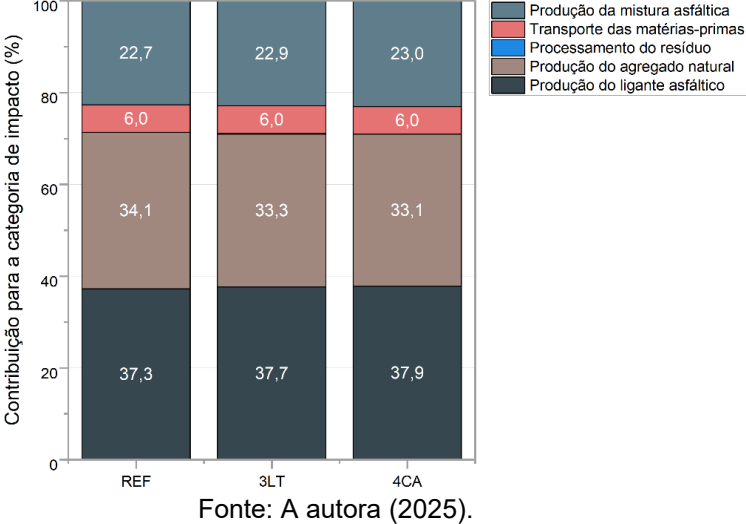
Na Figura 45, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Formação de material particulado fino.

Figura 45: Avaliação da categoria de impacto Formação de material particulado fino



Os sistemas alternativos apresentaram os menores impactos e os valores foram próximos entre eles (Figura 45). Na Figura 46, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

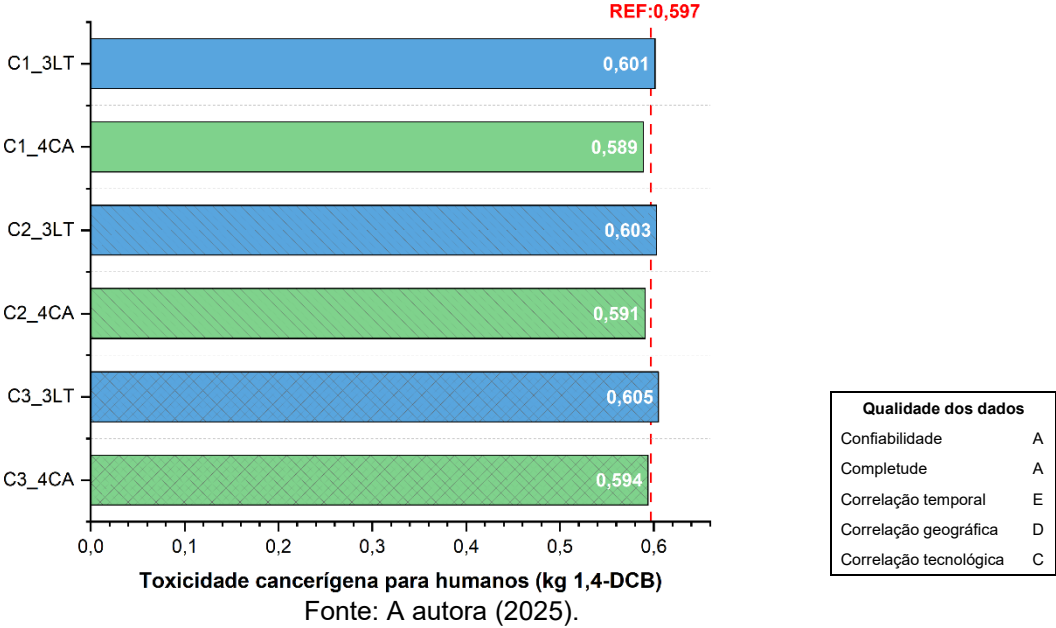
Figura 46: Contribuição dos processos na categoria de impacto Formação de material particulado fino



Os principais processos a contribuir foram a produção de ligante asfáltico e do agregado natural (Figura 46). Seus processos produtivos estão relacionados à formação de material particulado fino (BASCOMPTA *et al.*, 2022).

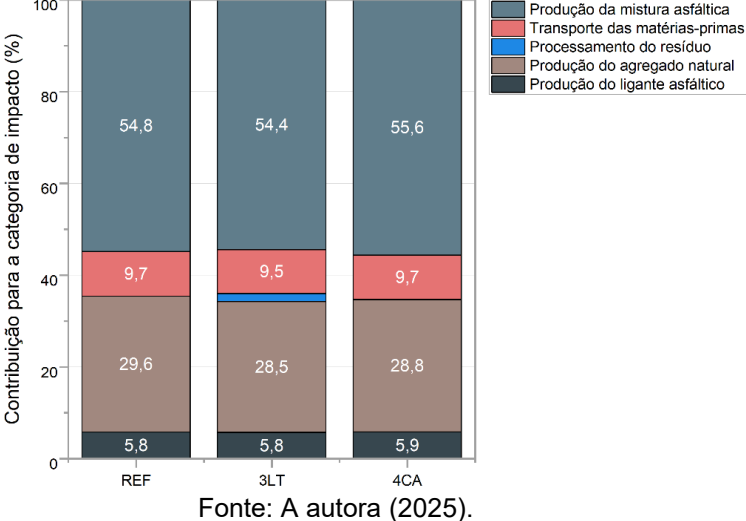
Na Figura 47, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Toxicidade cancerígena para humanos.

Figura 47: Avaliação da categoria de impacto Toxicidade cancerígena para humanos



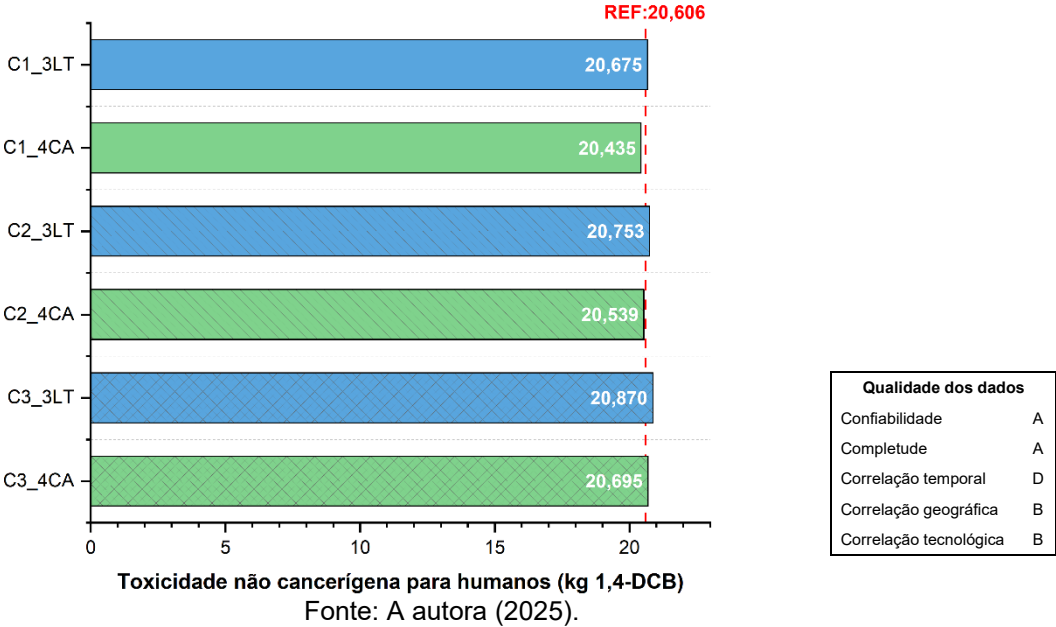
Na Figura 48, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 48: Contribuição dos processos na categoria de impacto Toxicidade cancerígena para humanos



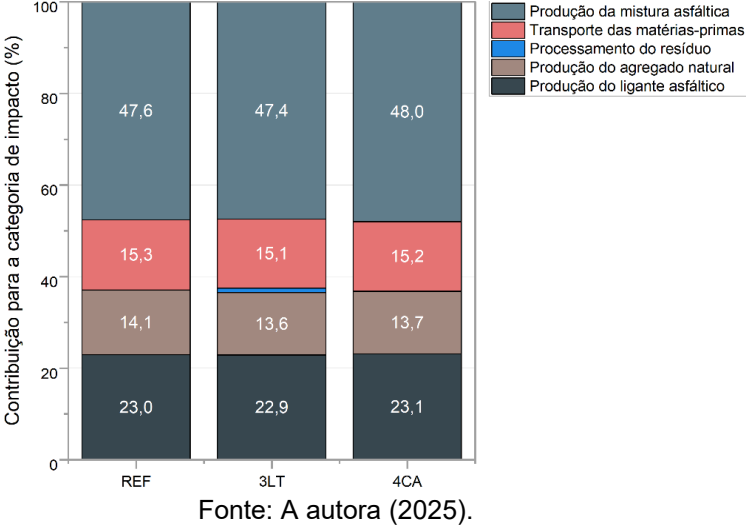
Na Figura 49, são apresentados os valores mensurados para a categoria de impacto Toxicidade não cancerígena para humanos.

Figura 49: Avaliação da categoria de impacto Toxicidade não cancerígena para humanos



Na Figura 50, são apresentados os percentuais de contribuição de cada processo nos valores de impacto obtidos.

Figura 50: Contribuição dos processos na categoria de impacto Toxicidade não cancerígena para humanos



Para as categorias de toxicidade para humanos, cancerígena e não cancerígena, os sistemas apresentaram pequenas variações (Figura 47 e Figura 49) e as principais contribuições foram relacionadas à produção da mistura asfáltica e do

ligante asfáltico (Figura 48 e Figura 50). No refino do petróleo, são formados compostos voláteis com potencial toxicidade a humanos, cancerígena e não cancerígena (CERBARO *et al.*, 2021).

4.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Para interpretar os resultados apresentados, é importante destacar as limitações do estudo realizado, tais como:

- **Dados utilizados:** As bases disponíveis para realização de estudos de ACV carecem de dados atualizados do contexto brasileiro. Assim, é necessário realizar adaptações e inferências na modelagem dos sistemas, o que agrega imprecisões nos valores de entrada e, por consequência, maiores incertezas nos resultados obtidos em cada categoria de impacto.
- **Estimativas realizadas:** Apesar dos diversos estudos avaliando a incorporação dos resíduos têxteis em materiais de construção, não existem aplicações em escala industrial na região. Por isso, não existem plantas em funcionamento realizando as etapas descritas de pré-tratamento dos resíduos. Por isso os dados utilizados no estudo se referem aos materiais desenvolvidos em laboratório. Dessa forma, para obtenção de dados próximos ao contexto de produção, foram definidos equipamentos que poderiam ser utilizados e, a partir de suas informações técnicas, estimados os consumos energéticos. Essas estimativas também agregam incertezas aos resultados obtidos.
- **Fronteiras do estudo:** Em decorrência dos dados limitados, principalmente de volume e destinação final das cinzas de algaroba e do lodo têxtil, foi estabelecida a fronteira *cradle-to-gate* para o estudo realizado, que limita a ACV à etapa de produção da mistura asfáltica. Essa limitação impossibilita a quantificação dos benefícios ambientais da não destinação dos materiais residuais a aterros sanitários.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas neste trabalho, podem ser apresentadas as seguintes considerações:

- I. Ao analisar os resultados obtidos, os principais fluxos de materiais e energia estão relacionados aos processos de produção da mistura asfáltica e do ligante asfáltico, responsáveis conjuntamente pelos maiores percentuais de contribuição em 13 das 18 categorias de impacto avaliadas. No estudo realizado, os valores de entrada nesses processos foram constantes o que impactou diretamente nos baixos percentuais de variação observados. A partir disso, é crucial que sejam desenvolvidas soluções para aumentar a eficiência do processo de produção da mistura asfáltica, bem como misturas asfálticas com menores teores de ligantes. Essas alternativas têm o potencial de contribuir, principalmente, para a redução dos impactos relacionados às mudanças climáticas.
- II. Os resultados obtidos na ACV demonstraram que os sistemas com concretos asfálticos alternativos foram responsáveis por pequenas reduções de impacto nas categoriais avaliadas. No caso do concreto asfáltico com incorporação de lodo têxtil, foi observado ainda algumas categorias nas quais o pré-tratamento necessário no resíduo tornou o impacto do sistema alternativo superior à referência em até 27,9%. Para os materiais com cinzas de algaroba, a maior redução de impacto observada foi de 2,3%. Como explicitado, devem ser consideradas as limitações do estudo, nomeadamente as imprecisões nos valores de entrada e as estimativas realizadas, que agregam incertezas com potencial de tornar pequenas variações irrelevantes. Porém, a fronteira definida para o estudo, em decorrência da indisponibilidade de dados, não favorece os sistemas alternativos, pois não engloba os benefícios ambientais da não destinação dos resíduos a aterro. Portanto, considerando a fronteira *cradle-to-gate* e as limitações do estudo, não foram observados benefícios ambientais da incorporação de lodo têxtil e cinzas de algaroba em concreto asfáltico, quando utilizadas condições de dosagem que guiaram esse estudo. Essa observação é relevante para suportar tomadas de decisão referentes aos sistemas analisados e investir nas oportunidades de melhoria identificadas ao longo do estudo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- Mensurar, em campo, os valores que foram estimados para construção do inventário do ciclo de vida neste estudo para obtenção de resultados com maior acurácia para a ACV.
- Incluir as demais etapas do ciclo de vida, não contempladas neste estudo, para realização de ACV dos sistemas analisados.
- Avaliar outros métodos de processamento dos resíduos industriais têxteis, visando a redução do consumo energético.
- Avaliar a redução do teor de ligante nos sistemas alternativos avaliados.
- Realizar a ACV para outras soluções de circularidade para os resíduos industriais têxteis, como a incorporação em outros materiais de construção.
- Avaliar a formação de cooperativas para pré-tratamento do lodo têxtil e das cinzas de algaroba.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, Ahmed; FAHEEM, Ahmed F.; WALTERS, Evelyn. Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 362, p. 132471, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132471.

ABED, Ahmed *et al.* Uncertainty analysis of life cycle assessment of asphalt surfacings. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 219–238, 2024. DOI: 10.1080/14680629.2023.2199882.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Brasília: ANP, 2024.

ALBRECHT. **Secador Indireto**. 2022. Disponível em: https://www.albrecht.com.br/wp-content/uploads/2022/06/BRUTHUS-F_2019_12_SITE-1.pdf. Acesso em: 25 set. 2024.

AL-HDABI, Abbas. Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 126, p. 544–551, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.070.

ALI, Liaqat; FIAZ, Akmal. Use of Fly Ash Along with Blast Furnace Slag as Partial Replacement of Fine Aggregate and Mineral Filler in Asphalt Mix, at High Temperature. *Em: MATERIAL DESIGN, CONSTRUCTION, MAINTENANCE, AND TESTING OF PAVEMENTS 2009*, Reston, VA. **Anais [...]**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009. p. 112–118. DOI: 10.1061/41045(352)18.

ALI, N.; CHAN, J. S.; SIMMS, S.; BUSHMAN, R.; BERGAN, A. T. Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 19–25, 1996. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(19).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. b.

ATES, Fatmanur; PARK, Kyu Tae; KIM, Kyeong Woo; WOO, Byeong Hun; KIM, Hong Gi. Effects of treated biomass wood fly ash as a partial substitute for fly ash in a geopolymer mortar system. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 376, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131063.

BALASUBRAMANIAN, J.; SABUMON, P. C.; LAZAR, John U.; ILANGO VAN, R. Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 22–28, 2006. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.01.011.

BARRA, Breno; MOMM, Leto; GUERRERO, Yader; BERNUCCI, Liedi. Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 86, n. 2, p. 995–1002, 2014. DOI: 10.1590/0001-3765201420130165.

BASCOMPTA, Marc; SANMIQUEL, Lluís; GANGOLELLS, Marta; SIDKI, Nor. LCA analysis and comparison in quarrying: Drill and blast vs mechanical extraction. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 369, p. 133042, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133042.

BATISTA DOS SANTOS, Géssica Zila; CALDAS, Lucas Rosse; FILHO, João de Almeida Melo; RAFAEL, Sandra Isabel Moreira; DA SILVA, Neliton Marques. Environmental performance of a cement composite reinforced with vegetable fibers cultivated in the Brazilian Amazon. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, [S. l.], v. 3, p. 100034, 2022. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100034.

BEG, Tahreem; SIDDIQUI, Muhammad Owais Raza; BUTTO, Muhammad Aslam; IQBAL, Kashif; SUN, Danmei. Utilization of textile denim sludge waste in high load-bearing structural applications. **Polimery/Polymers**, [S. l.], v. 67, n. 7–8, p. 298–307, 2022. DOI: 10.14314/polimery.2022.7.2.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti Da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BESHAH, Dawit Alemu; TIRUYE, Girum Ayalneh; MEKONNEN, Yedilfana Setarge. Characterization and recycling of textile sludge for energy-efficient brick production in Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 28, p. 16272–16281, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-11878-7/Published.

BEZADO, Adriana Petrucí. **Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira**. São Paulo: IEMI – Inteligência de Mercado, 2023. v. 23

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

BRASIL. Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2024a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Portaria GM/MDIC nº 309, de 13 de setembro de 2024. Institui o Fórum Nacional de Economia Circular. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2024b.

BURNETT, Annahid. A “saga” político-ecológica da algaroba no semiárido brasileiro. **Revista de Estudos Sociais**, [S. l.], 2017. DOI: 10.19093/res5031.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **PL 1874/2022**. 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=242287>. Acesso em: 18 fev. 2025.

CANTARELLA, Heitor; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; MARQUES, Letusa Momesso. Amônia verde: Reduzindo a pegada de carbono de fertilizantes nitrogenados. **Informações Agronômicas**, [S. l.], n. 18, 2023.

ÇELIK, Ö. Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt. **Petroleum Science and Technology**, [S. l.], v. 26, n. 13, p. 1571–1582, 2008. DOI: 10.1080/10916460701287474.

CERBARO, Daniela; DEMARCO, Carolina Faccio; CABALLERO, Cassia Brocca; SIQUEIRA, Tirzah Moreira. Compostos voláteis associados ao risco carcinogênico e não carcinogênico. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S. l.], v. 26, n. 1, p. 133–142, 2021. DOI: 10.1590/s1413-415220180215.

CHAUHAN, Ajay Singh; CHOPRA, Avani. Incorporation of Textile Mill Sludge and Fly Ash in Burnt Clay Brick Manufacturing. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 97–104, 2017.

CHEN, Chuihan; WU, Hongjuan. Lightweight bricks manufactured from ground soil, textile sludge, and coal ash. **Environmental Technology (United Kingdom)**, [S. l.], v. 39, n. 11, p. 1359–1367, 2018. DOI: 10.1080/09593330.2017.1329353.

CHENG, Zhiqing; HE, Lei; WANG, Lijun; LIU, Yu; YANG, Shiqiang; HE, Zhihai; LIU, Chun. Effect of Textile Sludge on Strength, Shrinkage, and Microstructure of Polypropylene Fiber Concrete. **Buildings**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2023. DOI: 10.3390/buildings13020379.

CHOI, Min Ju; KIM, Yong Joo; KIM, Hyeok Jung; LEE, Jae Jun. Performance evaluation of the use of tire-derived fuel fly ash as mineral filler in hot mix asphalt concrete. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 249–258, 2020. DOI: 10.1016/j.jtte.2019.05.004.

CHURCHILL, Eleni Vassiliadou; AMIRKHANIAN, Serji N. Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 295–301, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(295).

COMISSÃO EUROPEIA. **Um novo plano de ação para a Economia Circular**. Bruxelas: CE, 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular: caminho estratégico**. Brasília: CNI, 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 430, dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Brasil: CONAMA, 2011.

COPPI INDUSTRIAL. **Peneira rotativa vibratória horizontal**. 2022. Disponível em: <https://www.coppi.ind.br/produto/23/peneira-rotativa-vibratoria-horizontal>. Acesso em: 25 set. 2024.

COSTA, Catarina; AZOIA, Nuno G.; SILVA, Carla; MARQUES, Eduardo F. Textile industry in a changing world: Challenges of sustainable development. **U.Porto Journal of Engineering**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 86–97, 2020. DOI: 10.24840/2183-6493_006.002_0008.

CPRH. **Lavando Limpo**. Recife: Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco, 2018.

DAHLMANN, Frederik; BRANICKI, Layla; BRAMMER, Stephen. Managing Carbon Aspirations: The Influence of Corporate Climate Change Targets on Environmental Performance. **Journal of Business Ethics**, [S. l.], v. 158, n. 1, p. 1–24, 2019. DOI: 10.1007/s10551-017-3731-z.

EUROPEAN COMMISSION. **Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **Corporate sustainability reporting**. 2023. Disponível em: https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en. Acesso em: 9 jul. 2024.

FERNÁNDEZ-STARK, Karina; BAMBER, Penny; COUTO, Vivian. **Analysis of the Textile and Clothing Industry Global Value Chains-Summary**. Washington: Inter-American Development Bank, 2022.

GIRONDI DELAQUA, Geovana Carla; FERREIRA, Milena das Neves; AMARAL, Lucas Fonseca; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, Rubén Jesus; ATEM DE CARVALHO, Eduardo; FONTES VIEIRA, Carlos Maurício. Incorporation of sludge from effluent treatment plant of an industrial laundry into heavy clay ceramics. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 47, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103451.

GOYAL, Shweta; SIDDIQUE, Rafat; JHA, Sujant; SHARMA, Devender. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 214, p. 169–177, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.023.

GOYAL, Shweta; SIDDIQUE, Rafat; SHARMA, Devender; JAIN, Gaurav. Reutilization of textile sludge stabilized with low grade-MgO as a replacement of cement in mortars. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 338, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127643.

GRAFSTRÖM, Jonas; AASMA, Siri. Breaking circular economy barriers. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 292, p. 126002, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126002.

GUILLOT, Jaume Duch. **The impact of textile production and waste on the environment**. Luxemburgo: European Parliament, 2024.

HOSSAIN, Mohammad Sohrab; DAS, Subrata Chandra; ISLAM, Jahid M. M.; AL MAMUN, Md Abdullah; KHAN, Mubarak Ahmad. Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks – effect of gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, [S. l.], v. 151, p. 77–83, 2018. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.05.020.

HUWAE, David D. M.; PARERA, L. R.; TANIJAYA, J. Bagasse-Ash as Filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture. *Em: THE 2016 WORLD CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL, ENVIRONMENTAL, AND MATERIALS RESEARCH (ACEM16) 2016*, Jeju Island, Korea. **Anais [...]**. Jeju Island, Korea

JAMSHIDI, Ali; MOHD HASAN, Mohd Rosli; LEE, Mei Ting. Comparative study on engineering properties and energy efficiency of asphalt mixes incorporating fly ash and cement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 168, p. 295–304, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.137.

JITSANIGAM, Peerapong; BISWAS, Wahidul K.; COMPTON, Martyn. Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance. **Sustainable Materials and Technologies**, [S. l.], v. 17, p. e00071, 2018. DOI: 10.1016/j.susmat.2018.e00071.

JONY, Hassan H.; AL-RUBAIE, Mays F.; JAHAD, Israa Y. The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties. **Engineering and Technology Journal**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 44–57, 2011. DOI: 10.30684/etj.29.1.4.

JUNGMEIER, Gerfried; CANELLA, Lorenza; SCHWARZINGER, Stephan. **Life Cycle Assessment: Methodology and Data**. Graz: Green NCAP, 2023.

KASAW, Esubalew; ADANE, Zelalem; GEBINO, Gemed; ASSEFA, Nakachew; KECHI, Abera; ALEMU, Ketema. Incineration of Textile Sludge for Partial Replacement of Cement in Concrete Production: A Case of Ethiopian Textile Industries. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 2021, 2021. DOI: 10.1155/2021/9984598.

KHATER, Ahmed; LUO, Dong; ABDELSALAM, Moustafa; MA, Jianxun; GHAZY, Mohamed. Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures Using Composite Admixtures of Lignin and Glass Fibers. **Materials**, [S. l.], v. 14, n. 21, p. 6589, 2021. DOI: 10.3390/ma14216589.

KÖHLER, Andreas; WATSON, David; TRZEPACZ, Steffen; LÖW, Clara; LIU, Ran; DANNECK, Jennifer; KONSTANTAS, Antonios; DONATELLO, Shane; FARACA, Giorgia. **Circular economy perspectives in the EU textile sector**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2021.

LI, Jin; SANTOS, João; VARGAS-FARIAS, Andrea; CASTRO-FRESNO, Daniel; XIAO, Feipeng. Prospective LCA of valorizing end-of-life tires in asphalt mixtures with emerging pretreatment technologies of crumb rubber. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 210, p. 107828, 2024. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107828.

LI, Ruiming; ZHU, Xiaoxu; WANG, Yuhong. Comparisons of the properties and sustainability of asphalt binders modified with reactive thermosetting polymers. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 449, p. 138406, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138406.

LI, Xingwei; LI, Jingru; SHEN, Qiong. Infection mechanism of greenwashing behavior of construction material enterprises under multi-agent interaction. **Developments in the Built Environment**, [S. l.], v. 17, p. 100321, 2024. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100321.

MAHABIR, Johnathan; KOYLASS, Natalia; SAMAROO, Nicholas; NARINE, Kerissa; WARD, Keeran. Towards resource circular biodiesel production through glycerol upcycling. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 233, p. 113930, 2021. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.113930.

MARINHO, J. F. V.; NASCIMENTO, H. C. B.; NÓBREGA, A. C. V.; MARINHO, E. P.; LIMA, N. B. D. Ecological mortars produced from sustainable hydrated lime obtained from biomass ash. **Next Sustainability**, [S. l.], v. 5, p. 100067, 2025. DOI: 10.1016/j.nxsust.2024.100067.

MASCARENHAS, Zila M. G.; PIAO, Zhengyin; VASCONCELOS, Kamilla L.; POULIKAKOS, Lily D.; BERNUCCI, Liedi L. B. Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 858, p. 159862, 2023a. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159862.

MASCARENHAS, Zila Maria Garcia; SILVA, Fernanda Belizario; SILVA, Raimi Costa Da; ANDRADE, Diego Rios De; VASCONCELOS, Kamilla; BERNUCCI, Liedi Légi Bariani. Avaliação da pegada de carbono de misturas asfálticas com material fresado: um estudo de caso no Brasil. *Em: ANAIS DO(A) RAPV. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 2023b*, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu p. 848–858. DOI: 10.29327/1304307.48-70.

MELO, Marcio Couceiro Saraiva De. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no Arranjo Produtivo Local de Confeções do Agreste pernambucano**. 2012. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MELO, M. C. S.; NEVES, G. A.; MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. C.; NÓBREGA, A. C. V.; MARINHO, E. P. Cal produzida a partir de cinza de biomassa rica em cálcio. **Cerâmica**, [S. l.], v. 64, n. 371, p. 318–324, 2018. DOI: 10.1590/0366-69132018643712338.

MELOTTI, Roberto; SANTAGATA, Ezio; BASSANI, Marco; SALVO, Milena; RIZZO, Stefano. A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. **Waste Management**, [S. l.], v. 33, n. 9, p. 1906–1917, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.015.

MENDES JUNIOR, Biagio de Oliveira. Vestuário. **Caderno Setorial ETENE**, [S. l.], v. 9, n. 334, 2024.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. [s.l.] : McGraw-Hill, 2004.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. **CVM lança resolução para adotar indicadores claros e comparáveis em práticas sustentáveis de empresas que acessam o mercado de capitais**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/assuntos/noticias/2023/outubro/cvm-lanca-resolucao-para-adotar-indicadores-claros-e-comparaveis-em-praticas-sustentaveis-de-empresas-que-acessam-o-mercado-de-capitais>. Acesso em: 9 jul. 2024.

MODARRES, Amir; RAHMANZADEH, Morteza. Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 66, p. 476–483, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002.

MODARRES, Amir; RAHMANZADEH, Morteza; AYAR, Pooyan. Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 91, p. 262–268, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.078.

MODARRES, Amir; RAMYAR, Hossein; AYAR, Pooyan. Effect of cement kiln dust on the low-temperature durability and fatigue life of hot mix asphalt. **Cold Regions Science and Technology**, [S. l.], v. 110, p. 59–66, 2015. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.11.010.

MOINS, Ben; HERNANDO, David; BUYLE, Matthias; VAN DEN BERGH, Wim; AUDENAERT, Amaryllis. Reviewing the variability in product category rules for asphalt pavements – A quantitative evaluation of methodological framework differences for environmental product declarations. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 436, p. 140580, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140580.

MOURA, Lyneker Souza De. **Incorporação de cinzas de algaroba geradas no APL de Confeções do Agreste pernambucano em concreto betuminoso usinado a quente-CBUQ**. 2017. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

MOURA, Lyneker Souza De. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: Uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. 2021. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

MOURA, L. S., SILVA, C. C. V. P., OLIVEIRA, S. M., CARNEIRO, A. M. P., LUCENA, L. C. F. L., NÓBREGA, A. C. V. da. Use of calcium-rich wood biomass

combustion ashes as filler in hot mix asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, 23(10), 2375–2393, 2021. DOI: 10.1080/14680629.2021.1976253

NASSAR, Ahmed I.; MOHAMMED, Mahmoud Khashaa; THOM, Nicholas; PARRY, Tony. Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 114, p. 352–363, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.112.

NEGRETE-CARDOSO, Mariana; ROSANO-ORTEGA, Genoveva; ÁLVAREZ-AROS, Erick Leobardo; TAVERA-CORTÉS, María Elena; VEGA-LEBRÚN, Carlos Arturo; SÁNCHEZ-RUÍZ, Francisco Javier. Circular economy strategy and waste management: a bibliometric analysis in its contribution to sustainable development, toward a post-COVID-19 era. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 29, n. 41, p. 61729–61746, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-18703-3.

ORETO, Cristina; RUSSO, Francesca; DELL'ACQUA, Gianluca; VEROPALUMBO, Rosa. A comparative environmental life cycle assessment of road asphalt pavement solutions made up of artificial aggregates. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 927, p. 171716, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171716.

ORETO, Cristina; RUSSO, Francesca; VEROPALUMBO, Rosa; VISCIONE, Nunzio; BIANCARDO, Salvatore Antonio; DELL'ACQUA, Gianluca. Life Cycle Assessment of Sustainable Asphalt Pavement Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers. **Materials**, [S. l.], v. 14, n. 14, p. 3867, 2021. DOI: 10.3390/ma14143867.

PASANDÍN, Ana R.; PÉREZ, Ignacio; RAMÍREZ, Antonio; CANO, Miguel M. Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 112, p. 853–862, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.06.016.

PETRUCCI, Eladio Gerardo Requião. **Materiais de construção**. 6. ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

PRAVEENKUMAR, T. R.; MANIGANDAN, S.; GEMEDE, Habtamu Fekadu; PRABU, V.; BALAMOORTHY, Dhivya; TADESSE, Getnet; RATH, Badrinarayan. Effective utilization of waste textile sludge composite with Al₂O₃ nanoparticles as a value-added application. **Applied Nanoscience (Switzerland)**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 1251–1261, 2023. DOI: 10.1007/s13204-021-02001-4.

PRIYADHARSHINI, Baskaran; MANIKANNAN, Kavisri; PRIYADHARSHINI, B.; KAVISRI, M. Utilization of Textile Sludge in Manufacturing E-Bricks. **Article in International Journal of Civil Engineering and Technology**, [S. l.], v. 9, n. 11, p. 2266–2273, 2018.

PUTRA JAYA, Ramadhansyah; ROSLI HAININ, Mohd; ABDUL HASSAN, Norhidayah; YAACOB, Haryati; KHAIRUL IDHAM MOHD SATAR, Mohd; NAQUIDDIN MOHD WARID, Muhammad; MOHAMED, Azman; EZREE ABDULLAH, Mohd; IRWAN RAMLI, Noram. Marshall stability properties of asphalt mixture

incorporating black rice husk ash. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 10, p. 22056–22062, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.07.068.

RAHMAN, Ari; URABE, Takeo; KISHIMOTO, Naoyuki; MIZUHARA, Shinji. Effects of waste glass additions on quality of textile sludge-based bricks. **Environmental Technology (United Kingdom)**, [S. l.], v. 36, n. 19, p. 2443–2450, 2015. DOI: 10.1080/09593330.2015.1034188.

RONGALI, Umadevi; SINGH, Gagandeep; CHOURASIYA, Anita; JAIN, P. K. Laboratory Investigation on Use of Fly Ash Plastic Waste Composite in Bituminous Concrete Mixtures. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, [S. l.], v. 104, p. 89–98, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.101.

RUIZ, Lorena. **Global Textiles and Apparel Trade: A Post-Pandemic Review**. Washington: International Cotton Advisory Committee, 2022.

SAHA, G. C.; HASANATH, M. A.; UDDIN, M. N.; HASAN, M. Sustainable Utilization of Textile Dyeing Sludge and Coal Fly Ash by Brick Production Through Traditional Kilns. **Nature Environment and Pollution Technology**, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 971–980, 2022. DOI: 10.46488/NEPT.2022.v21i03.004.

SALEM, Zaydoun T. Abu; KHEDAWI, Taisir S.; BAKER, Musa Bani; ABENDEH, Raed. Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures. **Jordan Journal of Civil Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 1, 2017.

SARGIN, Şebnem; SALTAN, Mehmet; MOROVA, Nihat; SERIN, Sercan; TERZI, Serdal. Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 48, p. 390–397, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029.

SHATHIKA, B.; GANDHIMATHI, R.; RAMESH, S. T.; NIDHEESH, P. V. Utilization of textile effluent wastewater treatment plant sludge as brick material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 564–570, 2013. DOI: 10.1007/s10163-013-0139-4.

SILVA, Carina Lessa; MARINHO, Érika Pinto; NÓBREGA, Ana Cecilia Vieira De; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. Incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil: uma busca sistemática. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 24, 2024. DOI: 10.1590/s1678-86212024000100726.

SOBOLEV, Konstantin; FLORES VIVIAN, Ismael; SAHA, Rajan; WASIUDDIN (WASI), Nazimuddin M.; SALTIBUS, Nibert E. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. **Fuel**, [S. l.], v. 116, p. 471–477, 2014. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.07.123.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Resumo Executivo com os principais resultados do Estudo de Competitividade (Produto 3) e do Plano de Ações (Produto 4) para o desenvolvimento das cadeias Têxtil e de Confecções da área de atuação da Sudene**. Recife: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2023.

SUPPIPAT, Suphichaya; CHOTIRATANAPINUN, Treechada; TEACHAVORASINSKUN, Kulthida; HU, Allen H. Designer's Guide for Life Cycle Assessment. *Em*: [s.l.: s.n.]. p. 15–29. DOI: 10.1007/978-3-031-15060-9_2.

SUWARTO, Fardzanela; PARRY, Tony; AIREY, Gordon. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 25, n. 8, p. 1631–1657, 2024. DOI: 10.1080/14680629.2023.2278149.

SWARNA, Surya Teja; HOSSAIN, Kamal; BERNIER, Alyssa. Climate change adaptation strategies for Canadian asphalt pavements; Part 2: Life cycle assessment and life cycle cost analysis. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 370, p. 133355, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133355.

ULLAH, S. M. Habib; HASAN, Mehedi; AHMAD, Syed Ishtiaq; AHMED, Tanvir. Performance of industrial sludge-amended bricks manufactured in conventional kilns. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 1932–1942, 2020. DOI: 10.1007/s10163-020-01080-9.

VASUDEVAN, Gunalaan. Performance on coal bottom ash in hot mix asphalt. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, [S. l.], v. 02, n. 08, p. 24–33, 2013. DOI: 10.15623/ijret.2013.0208004.

VERDÉS. **Moinho de Martelos**. 2021. Disponível em: <https://www.verdes.com.br/wp-content/uploads/2021/10/moinho-martelos-144.pdf>. Acesso em: 25 set. 2024.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1996.

WANG, Fusong; HOFF, Inge; YANG, Fei; WU, Shaopeng; XIE, Jun; LI, Na; ZHANG, Lei. Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 297, p. 126659, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126659.

WOSZUK, Agnieszka; BANDURA, Lidia; FRANUS, Wojciech. Fly ash as low cost and environmentally friendly filler and its effect on the properties of mix asphalt. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 235, p. 493–502, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.353.

YAO, Kainan; MA, Xiaojun; ZHANG, Jingying. Green disguise or real action? The truth behind corporate greenwashing under stringent climate policy. **Energy Economics**, [S. l.], p. 108059, 2024. DOI: 10.1016/j.eneco.2024.108059.

YAO, Linyi; LENG, Zhen; LAN, Jingting; CHEN, Ruiqi; JIANG, Jiwang. Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 336, p. 130405, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130405.

YUE, Yanchao; ABDELSALAM, Moustafa; KHATER, Ahmed; GHAZY, Mohamed. A comparative life cycle assessment of asphalt mixtures modified with a novel composite of diatomite powder and lignin fiber. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 323, p. 126608, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126608.

ZAINUDIN, M. Zulfikri M.; KHAIRUDDIN, Faridah Hanim; NG, Choy Peng; CHE OSMI, Siti Khadijah; MISNON, Noor Aina; SYARIPUDDIN, Murniati. Effect of Sugarcane Bagasse Ash as Filler in Hot Mix Asphalt. **Materials Science Forum**, [S. l.], v. 846, p. 683–689, 2016. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.846.683.

ZHAN, Bao Jian; LI, Jiang Shan; XUAN, Dong Xing; POON, Chi Sun. Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: Physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 381, 2020. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121034.

ZHAN, Bao Jian; POON, Chi Sun. Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 101, p. 174–179, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.083.

APÊNDICE A – GLOSSÁRIO¹

Acidificação Terrestre - Categoria de impacto ambiental que quantifica o potencial de deposição de substâncias acidificantes, como dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio e amônia, na superfície terrestre. Essa deposição pode levar à acidificação do solo e da água, prejudicando ecossistemas, vegetação, e causando danos a edifícios e infraestruturas.

Aquecimento Global - Categoria de impacto que mede o potencial de substâncias emitidas para a atmosfera, principalmente gases de efeito estufa como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, de absorver e reemitir radiação infravermelha, contribuindo para o aumento da temperatura média da Terra e consequentes alterações climáticas.

Consumo de Água - Categoria de impacto que quantifica a quantidade de água doce, superficial ou subterrânea, retirada de fontes e que não é retornada ao mesmo corpo hídrico ou à mesma bacia em um período relevante.

Depleção de Ozônio Estratosférico - Categoria de impacto que avalia o potencial de certas substâncias químicas de reagir e destruir a camada de ozônio na estratosfera.

Ecotoxicidade de Água Doce - Categoria de impacto que mede o potencial de substâncias tóxicas liberadas no ambiente aquático doce de causar efeitos adversos a organismos vivos nesses ecossistemas, como peixes, invertebrados e plantas aquáticas.

Ecotoxicidade Marinha - Categoria de impacto que mede o potencial de substâncias tóxicas liberadas no ambiente aquático marinho de causar efeitos adversos a organismos vivos nesses ecossistemas, como peixes, mamíferos marinhos e corais.

Ecotoxicidade Terrestre - Categoria de impacto que mede o potencial de substâncias tóxicas liberadas no solo ou transportadas para ele de causar efeitos

¹ As definições apresentadas neste glossário foram elaboradas com base no ILCD Handbook – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

adversos a organismos vivos em ecossistemas terrestres, como plantas, microrganismos e invertebrados do solo.

Escassez de Recursos Fósseis - Categoria de impacto que avalia o potencial de exaustão de reservas de combustíveis fósseis devido à sua utilização. Considera a taxa de extração em relação às reservas remanescentes e ao tempo de formação desses recursos.

Escassez de Recursos Minerais - Categoria de impacto que avalia o potencial de esgotamento de depósitos de minerais não renováveis devido à sua extração e uso. Considera a abundância crustal, a concentração dos depósitos e a taxa de extração.

Eutrofização de Água Doce - Categoria de impacto que quantifica o potencial de enriquecimento de corpos d'água doce com nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, o que pode levar ao crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas. Isso causa a diminuição do oxigênio dissolvido na água, prejudicando a vida aquática e a qualidade da água.

Eutrofização Marinha - Categoria de impacto que quantifica o potencial de enriquecimento de corpos d'água marinha com nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, resultando em florações de algas e, conseqüentemente, em zonas de baixo oxigênio, afetando a vida marinha.

Formação de Material Particulado Fino - Categoria de impacto que avalia o potencial de emissão de precursores de partículas finas que reagem na atmosfera para formar material particulado fino, que são associadas a problemas respiratórios e cardiovasculares em humanos.

Formação de Ozônio, Ecossistemas Terrestres - Categoria de impacto que avalia o potencial de emissão de precursores de ozônio troposférico, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis não metânicos, que reagem na atmosfera e formam ozônio próximo ao solo. Esse ozônio é prejudicial à vegetação, afetando a fotossíntese e o crescimento de plantas.

¹ As definições apresentadas neste glossário foram elaboradas com base no ILCD Handbook – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Formação de Ozônio, Saúde Humana - Categoria de impacto que avalia o potencial de emissão de precursores de ozônio troposférico que, ao se formar na baixa atmosfera, podem causar problemas respiratórios, irritação nos olhos e outros problemas de saúde em humanos.

Radiação Ionizante - Categoria de impacto que mede o potencial de emissões de núclídeos radioativos, resultantes, por exemplo, da geração de energia nuclear ou de processos industriais, de causar danos à saúde humana e ao meio ambiente através da exposição à radiação ionizante.

Toxicidade Cancerígena para Humanos - Categoria de impacto que avalia o potencial de substâncias tóxicas liberadas no ambiente de causar câncer em humanos, seja por exposição direta ou indireta através da cadeia alimentar ou do ambiente.

Toxicidade Não Cancerígena para Humanos - Categoria de impacto que avalia o potencial de substâncias tóxicas liberadas no ambiente de causar uma variedade de efeitos adversos à saúde humana que não são câncer, seja por exposição direta ou indireta.

Uso do Solo - Categoria de impacto que avalia as consequências ambientais das alterações na cobertura e uso da terra, como a conversão de florestas para agricultura, urbanização ou mineração. Os impactos podem incluir perda de biodiversidade, erosão do solo, alterações no ciclo da água e mudanças no balanço de carbono.

¹ As definições apresentadas neste glossário foram elaboradas com base no ILCD Handbook – General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed Guidance (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

APÊNDICE B – FLUXOS DE ENTRADA

						Continua
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado	
a45cd247-3532-4e27-bddc-b519fdb5e08f	Aluminium	Recurso	no solo	kg	0,042079	
6df9ea09-115a-4678-9f30-d92c877a46ec	Anhydrite	Recurso	no solo	kg	2,51E-07	
47262180-8308-5d4c-9332-c77617e032ef	Antimony	Recurso	no solo	kg	3,39E-09	
8b46f615-69c9-4ca3-815e-a7bde116d202	Argon-40	Recurso	no ar	kg	0,005583	
e16fd15c-0ebc-55ba-8d3b-9704f13663cb	Arsenic	Recurso	no solo	kg	4,36E-08	
240177d8-6f3b-43f5-8d1e-0c18114dfa02	Barium	Recurso	no solo	kg	0,42034	
ac3a8914-35f0-4c34-a956-f26b3a053e4a	Basalt	Recurso	no solo	kg	0,000842	
eead2933-c2be-4a53-a0bd-bd33b67e4145	Borax	Recurso	no solo	kg	1,59E-09	
b053aa52-bfac-5435-a0b1-4ca374b0e991	Boron	Recurso	no solo	kg	2,25E-05	
45d6f26b-596b-5182-8c08-d6d975ff4efe	Bromine	Recurso	na água	kg	0,000175	
bf377e4f-3a95-4ce2-a9ba-66ee31f00f60	Cadmium	Recurso	no solo	kg	1,16E-07	
99ee393d-4bd1-4cc8-b0a0-d956865fb7bf	Calcite	Recurso	no solo	kg	0,92481	
c8fc4197-7410-42f2-aeb4-c08c6a693992	Calcium	Recurso	no solo	kg	0,000126	
cc6a1abb-b123-4ca6-8f16-38209df609be	Carbon dioxide, in air	Recurso	no ar	kg	0,791047	
8c2fe757-6866-4ed2-9f89-81012ad774a0	Carbon, organic, in soil or biomass stock	Recurso	no solo	kg	0,017889	
d16c8806-7701-4fbb-b68d-9b2d5d083d7a	Carnallite	Recurso	na água	kg	2,36E-06	
4057f8b4-f20a-59c9-9bb7-fdeaf5ad106d	Cerium	Recurso	no solo	kg	1,13E-06	
e189e2d4-3d3f-4ada-b302-91611784311f	Chromium	Recurso	no solo	kg	0,000672	
c5f5aeb8-7558-4a0c-9594-27621b9cfbc5	Chrysotile	Recurso	no solo	kg	4,56E-05	
93806a54-46f5-409c-99c5-4144a1e73b5d	Clay, bentonite	Recurso	no solo	kg	0,035354	
f7519ca9-5ffc-41c3-a33e-806da82cfc0e	Clay, unspecified	Recurso	no solo	kg	0,121106	
024c9722-1e88-412b-8c4b-10c532be8dca	Coal, brown	Recurso	no solo	kg	0,319155	
b6d0042d-0ef8-49ed-9162-a07ff1ccf750	Coal, hard, unspecified	Recurso	no solo	kg	1,545828	
d0779a5e-6969-4144-954e-ceb81fb83f15	Cobalt	Recurso	no solo	kg	4,95E-06	
a9ac40a0-9bea-4c48-afa7-66aa6eb90624	Copper	Recurso	no solo	kg	0,005568	
9877ce00-65f8-4c0c-9fcf-92aa53a2c9c0	Diatomite	Recurso	no solo	kg	9,62E-10	

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
c7aee986-b7d8-4ad9-ad45-1ac0d68e6b78	Dolomite	Recurso	no solo	kg	0,013763
9e28eac3-49f9-5a0d-a8d0-dc4e071ad9e6	Dysprosium	Recurso	no solo	kg	3,94E-10
8bc09c04-2190-4ee2-9ee2-ae988ccd4e0c	Energy, geothermal, converted	Recurso	no solo	MJ	0,045107
01c12fca-ad8b-4902-8b48-2d5afe3d3a0f	Energy, gross calorific value, in biomass	Recurso	biótico	MJ	10,42797
8842042d-7f07-45f8-bf43-fa83833d75de	Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	Recurso	biótico	MJ	0,229197
57c71b25-4663-4fad-9167-7ce5be3e8268	Energy, kinetic (in wind), converted	Recurso	no ar	MJ	5,637929
c0dd7ccd-9e7a-42b3-b899-dfd18c2150ca	Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	Recurso	na água	MJ	13,54185
a7ff17d4-d3fe-4a70-9f2e-392b34630772	Energy, solar, converted	Recurso	no ar	MJ	0,202865
3d73ec21-de4d-5b68-b504-4ef59e15bd0e	Europium	Recurso	no solo	kg	4,66E-09
26296ec9-ff93-41e6-bbbf-6175af04284d	Feldspar	Recurso	no solo	kg	8,14E-09
3048af84-1d72-5e3f-a739-b2d7fa7d4773	Fluorine	Recurso	no solo	kg	0,001055
0fa4f51e-b0dc-5d11-84d3-b32f0f3c88d5	Fluorspar	Recurso	no solo	kg	0,009185
f55e2203-ef91-50bf-8f5a-119bb210522c	Gadolinium	Recurso	no solo	kg	1,57E-08
0878c1c6-4c1d-4f90-a2de-a9383855d5c6	Gallium	Recurso	no solo	kg	1,31E-05
0d218f74-181d-49b6-978c-8af836611102	Gangue	Recurso	no solo	kg	0,537918
3ed5f377-344f-423a-b5ec-9a9a1162b944	Gas, mine, off-gas, process, coal mining	Recurso	no solo	Sm3	0,013378
7c337428-fb1b-45c7-bbb2-2ee4d29e17ba	Gas, natural	Recurso	no solo	Sm3	13,88657
d080e6a4-42c6-484e-b5d7-d74693aec7d9	Gold	Recurso	no solo	kg	1,06E-07
a4375a18-172c-4f82-90b7-bca972f75548	Granite	Recurso	no solo	kg	917,1567
5666353e-2db2-41d3-8414-404709151422	Graphite	Recurso	no solo	kg	4,14E-05
238f8ea9-98df-41dc-ab93-ea5b549a0b96	Gravel	Recurso	no solo	kg	5,484651
11a2a7b1-ab2f-47b8-9e29-6f33d5207fa6	Gypsum	Recurso	no solo	kg	0,01978
1836d8db-abda-5275-8445-4904f7a8f91d	Hafnium	Recurso	no solo	kg	5,46E-09
36a3d172-7373-507f-85bd-12b8ba31a6d4	Iodine	Recurso	na água	kg	3,42E-05
8ce3ff02-7a1e-48e3-881e-3248b944f28a	Iron	Recurso	no solo	kg	1,048069
81ff5c0b-c44f-534e-a55e-8fc017e33dd2	Kaolinite	Recurso	no solo	kg	-0,00096
f3380341-7f76-5423-9704-c25ccf777a39	Kieserite	Recurso	no solo	kg	1,59E-06
176598c1-699c-5dd8-8c33-d269ff7f5edd	Lanthanum	Recurso	no solo	kg	5,52E-07

Fonte: A autora (2025).

Continua

Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
86fb18d4-a425-407a-94bc-194254e4d7d7	Laterite	Recurso	no solo	kg	0,003581
fbcb9c7a-eea7-4694-ba6c-568e01d28883	Lead	Recurso	no solo	kg	0,000216
7d2c1cdd-a64a-5936-a577-5b82db0c0d1b	Lithium	Recurso	no solo	kg	3,55E-07
a4bab069-74a9-5b4c-8d6e-5ca984cd9ecd	Magnesite	Recurso	no solo	kg	-0,00626
9e5823ad-9d9b-4b98-b627-e39611b6a8bd	Magnesium	Recurso	no solo	kg	9,98E-05
c2586875-bb56-4b1e-84c5-5ff255a1108b	Manganese	Recurso	no solo	kg	0,012416
54b9cbd0-65df-4fd3-8a19-dd3b8eccc619	Mercury	Recurso	no solo	kg	8,19E-10
e5a3dff5-72dc-5287-893c-597dd4a19566	Molybdenum	Recurso	no solo	kg	0,00071
db0c855c-e9ef-58d9-97cc-960e646fc882	Neodymium	Recurso	no solo	kg	4,12E-07
974213ef-1ba0-40e5-bc7b-52ef099e9e09	Nickel	Recurso	no solo	kg	0,010658
8de8befc-efa2-5d07-a58b-b29ea97a3f41	Niobium	Recurso	no solo	kg	-1,1E-07
e3f5fd63-7dcb-41f1-9b8a-a48a8d68bc65	Nitrogen	Recurso	no ar	kg	0,301098
c5aafa60-495c-461c-a1d4-b262a34c45b9	Occupation, annual crop	Recurso	terreno	m2*a	0,004503
c4a82f46-381f-474c-a362-3363064b9c33	Occupation, annual crop, irrigated	Recurso	terreno	m2*a	-3E-05
9fd128fe-d8c5-476f-af42-2795d5f5d227	Occupation, annual crop, irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2*a	1,85E-06
a6889a22-e99e-42ea-85cd-4a68d7975dcd	Occupation, annual crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2*a	8,34E-05
1b0a8570-eab4-46c2-9b67-c9b918e75676	Occupation, annual crop, non-irrigated, extensive	Recurso	terreno	m2*a	7,05E-07
e063ee9c-9850-42b5-b01e-4cc9b5ad7152	Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2*a	-0,0196
8c173ca1-5f74-4a6e-89e5-dd18e0f18d1a	Occupation, arable land, unspecified use	Recurso	terreno	m2*a	1,75E-12
4b6b9b76-3199-4bd0-b11d-f8f2efbeac4e	Occupation, construction site	Recurso	terreno	m2*a	0,010007
1eaa9ea4-40b8-414a-b198-5626400372e1	Occupation, dump site	Recurso	terreno	m2*a	0,022424
2925111b-3464-4e34-9d02-b73c1c033e91	Occupation, forest, extensive	Recurso	terreno	m2*a	0,000938
aca1714f-0040-4a65-a73a-0e38aa9f50f4	Occupation, forest, intensive	Recurso	terreno	m2*a	0,520682
2b8a0f87-bd2a-4b10-8dd9-714487f59fc9	Occupation, grassland, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2*a	0,000179
fe9c3a98-a6d2-452d-a9a4-a13e64f1b95b	Occupation, industrial area	Recurso	terreno	m2*a	0,076309
e5824519-f945-4b2c-a81b-677290021b8a	Occupation, inland waterbody, unspecified	Recurso	terreno	m2*a	4,77E-08
69dfa439-8e4e-4cae-bb0c-85a8aa8b9a73	Occupation, lake, artificial	Recurso	terreno	m2*a	0,226341
379ba5c9-5c3a-43d0-8e2d-605ad9c39e46	Occupation, mineral extraction site	Recurso	terreno	m2*a	0,2375

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
19f84b2e-e6ff-4351-ba3a-8b650fc20d14	Occupation, pasture, man made, extensive	Recurso	terreno	m2*a	9,72E-10
98b723d4-3362-4b38-8b1e-1bedacfd5e27	Occupation, pasture, man made, intensive	Recurso	terreno	m2*a	5,53E-05
e9007a6f-7244-44d4-a561-91ae1b6c6cfc	Occupation, permanent crop	Recurso	terreno	m2*a	0,148442
1896b498-8d13-4f58-8c17-21fe57740158	Occupation, permanent crop, irrigated	Recurso	terreno	m2*a	0,008585
18636f13-f552-4136-a353-3b5a8e5f87d1	Occupation, permanent crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2*a	4,05E-07
c14ea750-4a9f-41fa-bcc1-4a1d84466f43	Occupation, river, artificial	Recurso	terreno	m2*a	0,005269
70c4c6d8-ed81-4763-ae6d-39e54ef0b1fa	Occupation, seabed, drilling and mining	Recurso	terreno	m2*a	0,221392
9db06277-b6d9-4c48-8cfb-de342e928a50	Occupation, seabed, infrastructure	Recurso	terreno	m2*a	0,001334
c199261c-8234-43c5-b906-5b67707e4395	Occupation, shrub land, sclerophyllous	Recurso	terreno	m2*a	0,001364
062a6faf-b1a5-4a6a-aa02-47ae3ec566a8	Occupation, traffic area, rail network	Recurso	terreno	m2*a	0,002402
956c5f83-65c8-4607-9749-147cfb9c8f70	Occupation, traffic area, rail/road embankment	Recurso	terreno	m2*a	0,047814
26efe47c-92a5-4dea-b4d0-eac13e418a58	Occupation, traffic area, road network	Recurso	terreno	m2*a	0,209161
c7cb5880-4219-4051-9357-10fdd08c6f2b	Occupation, unspecified	Recurso	terreno	m2*a	0,000413
061259d7-7bcc-4298-af3a-63d084191988	Occupation, unspecified, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2*a	7,12E-06
56ec994a-eb96-42e8-93eb-4970e30e6362	Occupation, urban, discontinuously built	Recurso	terreno	m2*a	7,92E-05
70aa745b-8bc5-4433-b2f5-d1da652ba166	Occupation, urban/industrial fallow (non-use)	Recurso	terreno	m2*a	3,84E-06
88d06db9-59a1-4719-9174-afeb1fa4026a	Oil, crude	Recurso	no solo	kg	58,08317
d7cad9a-f42c-4711-a8e2-0b626c0a4c7a	Olivine	Recurso	no solo	kg	8,9E-08
af01e564-f816-4906-bd4f-b7c932f926b9	Oxygen	Recurso	no ar	kg	0,22615
edc69c63-a776-4dbf-acbf-e0368914980a	Palladium	Recurso	no solo	kg	-1,8E-08
c5035ce2-5ee5-431f-a287-4b25da42be74	Peat	Recurso	biótico	kg	1,74E-05
09a68c14-01f6-4dee-ba29-8b7f400b72b5	Perlite	Recurso	no solo	kg	1,89E-06
483ae3c5-4eb0-46e4-b811-a72ad391716b	Phosphorus	Recurso	no solo	kg	0,011013
d13b2665-505d-49e2-8edd-dc966b0342af	Platinum	Recurso	no solo	kg	6,98E-08
e373f7b4-42e9-4cc7-a73c-f87bec88008b	Potassium	Recurso	no solo	kg	0,00229
35da65ff-7287-571d-b859-13d398ac5182	Praseodymium	Recurso	no solo	kg	1,38E-07
a2e6fb74-b047-5697-b5dd-e28cc68f29e6	Rhenium	Recurso	no solo	kg	-8,7E-09
4803f22f-6950-489b-914d-fa953a8081f6	Rhodium	Recurso	no solo	kg	1,14E-08

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
cf791833-26bc-5207-a9bd-6ddcd8ac7625	Samarium	Recurso	no solo	kg	1,94E-08
423ef039-6057-4f63-94bd-e9410d024bd0	Sand, unspecified	Recurso	no solo	kg	0,36442
7f9f9b59-35a0-584d-ad5e-07da01dde768	Scandium	Recurso	no solo	kg	1,87E-09
5f47f918-1c32-5870-b992-db91f843ff34	Selenium	Recurso	no solo	kg	-6,5E-06
9e9b6792-40e6-4d62-a3e0-ebebc0c65166	Shale	Recurso	no solo	kg	0,261311
00143719-33a7-5738-aa1b-131f97b4fef3	Silicon	Recurso	no solo	kg	0,00011
361a64cb-ab76-4a72-9ea1-c07d6a20c124	Silver	Recurso	no solo	kg	-3,9E-06
fab932d4-0a58-491c-9d7f-294d07a7953d	Sodium	Recurso	no solo	kg	1,35E-07
0b9159dd-305d-4add-802f-f7b780ed0289	Sodium chloride	Recurso	no solo	kg	0,161691
a2a4f255-ad47-4cf8-b6a9-e10885d61407	Sodium nitrate	Recurso	no solo	kg	2,64E-06
5bbcdc6d-b1a7-4b63-b625-76060c767de7	Sodium sulphate, various forms	Recurso	no solo	kg	-0,03696
5324b57a-96f1-4dc3-9dc5-544881960f4f	Spodumene	Recurso	no solo	kg	2,15E-05
0f1b21d0-2780-4742-87f2-28fb21a44db5	Strontium	Recurso	no solo	kg	2,89E-07
852281f6-db73-4250-84d3-86b569fce0c1	Sulfur	Recurso	no solo	kg	0,000342
b1e13de6-e0a4-56b6-b096-7ab1171d60e3	Sylvite	Recurso	no solo	kg	0,015359
bc97531c-12d8-4113-bcb2-663a47d12d0f	Talc	Recurso	no solo	kg	0,000282
775fdf03-b0bb-5c25-b14d-107231d5b2f0	Tantalum	Recurso	no solo	kg	6,12E-07
7b6da1f2-e191-5a77-ae06-af96201f5803	Tellurium	Recurso	no solo	kg	-5,2E-07
6ec6a8a8-4c94-5bc5-93c5-62928fcf3935	Terbium	Recurso	no solo	kg	2,37E-10
53d5ef26-66d8-4536-afa2-2f6b114189ba	Tin	Recurso	no solo	kg	2,07E-05
2f033407-6060-4e1e-868c-9f362d10fdb2	Titanium	Recurso	no solo	kg	0,005669
f05cca02-ec18-4acc-9939-59658ff9a554	Transformation, from annual crop	Recurso	terreno	m2	0,001409
a70beb60-354d-4dcd-b6fd-8c251357fb2a	Transformation, from annual crop, irrigated	Recurso	terreno	m2	-1,9E-05
10ebc72c-2c4b-45ea-abd8-cb7fe0805883	Transformation, from annual crop, irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2	2,01E-06
4b420f19-0421-461e-a0b6-7efbf580089b	Transformation, from annual crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2	-0,00098
c7869c43-266c-429d-bfd5-6b578ed32ce8	Transformation, from annual crop, non-irrigated, extensive	Recurso	terreno	m2	6,62E-07
ab3e851e-21c9-47cf-8e7d-5f96dfae3ba5	Transformation, from annual crop, non-irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2	-0,01959
4d166779-88fd-441b-9537-f3b974e3bff7	Transformation, from arable land, unspecified use	Recurso	terreno	m2	0,003916

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
4da2ea28-8273-4901-9931-264169ec7731	Transformation, from cropland fallow (non-use)	Recurso	terreno	m2	8,43E-06
c1513682-45ad-444e-afb5-27c660714e88	Transformation, from dump site, inert material landfill	Recurso	terreno	m2	0,000195
7fdc928c-f347-45e7-82d7-046acdf878ae	Transformation, from dump site, residual material landfill	Recurso	terreno	m2	7,43E-05
b79e26a0-88db-441f-b79b-508506e81b93	Transformation, from dump site, sanitary landfill	Recurso	terreno	m2	2,92E-06
7d5b5802-3698-4be8-98f8-ab7c1a2e9328	Transformation, from dump site, slag compartment	Recurso	terreno	m2	1,76E-07
e71f95a5-fd82-4128-9fd1-be3f0e85d0fc	Transformation, from forest, extensive	Recurso	terreno	m2	0,00011
e717f3cc-ac70-4c9b-be56-1614239b917e	Transformation, from forest, intensive	Recurso	terreno	m2	0,006908
9d136389-8670-45ae-ad1d-a06848a1fd1d	Transformation, from forest, primary (non-use)	Recurso	terreno	m2	0,000379
9cc80820-fcf9-4ea9-8e67-0aa423eba6a4	Transformation, from forest, secondary (non-use)	Recurso	terreno	m2	0,000966
0930b6b8-d9c6-4462-966f-ac7495b63bed	Transformation, from forest, unspecified	Recurso	terreno	m2	0,007174
b905c2e0-a0db-4e66-80d2-8bdfc93c6218	Transformation, from grassland, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2	3,09E-05
c12ed8b5-8452-43ca-9986-a814e908e792	Transformation, from grassland, natural, for livestock grazing	Recurso	terreno	m2	5,75E-06
2e002771-9f22-43e3-9990-f06f8235700b	Transformation, from heterogeneous, agricultural	Recurso	terreno	m2	1,33E-09
b6dcefd8-3848-4338-9c3e-fe6e91f20937	Transformation, from industrial area	Recurso	terreno	m2	1,57E-05
64d99cb5-3b4f-4195-b86f-c5f45b4dcd19	Transformation, from mineral extraction site	Recurso	terreno	m2	0,000175
2c126bcc-bb63-4d63-bd72-f02a1e616809	Transformation, from pasture, man made	Recurso	terreno	m2	0,000505
82f2476e-988b-4d7a-bde6-5da9337d1f65	Transformation, from pasture, man made, extensive	Recurso	terreno	m2	1,94E-11
592bf69f-8551-4611-8942-4620be0adabe	Transformation, from pasture, man made, intensive	Recurso	terreno	m2	3,65E-06
fc77a5a-6882-4aeb-82a9-ba57688d2224	Transformation, from permanent crop	Recurso	terreno	m2	0,00832
73cba245-5969-4076-8490-75a236073196	Transformation, from permanent crop, irrigated	Recurso	terreno	m2	0,000409
31e4e26b-a997-4969-963d-243699aca3a8	Transformation, from permanent crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2	2,03E-08
b06ca23e-c6c0-478b-a65c-50e5e5dd8440	Transformation, from river, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2	6,91E-06
bbcdd18c-4d16-4c28-b031-d988884030a7	Transformation, from seabed, infrastructure	Recurso	terreno	m2	2,32E-06
928ba839-d6e5-4d1e-b5fd-122998a9bbe2	Transformation, from seabed, unspecified	Recurso	terreno	m2	0,221437
17a5a406-333f-4b9e-8852-c2de50bc9585	Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Recurso	terreno	m2	0,000286
46b8b2fd-eb2a-413d-bc39-e7dc18a420ef	Transformation, from traffic area, rail/road embankment	Recurso	terreno	m2	3,34E-05
29630a65-f38c-48a5-9744-c0121f586640	Transformation, from unspecified	Recurso	terreno	m2	0,004256
1a1d0d4b-6b95-4815-ad06-2ec5fe333c43	Transformation, from unspecified, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2	2,86E-07

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
0782d8ff-80e5-47a7-a2ba-3ba40ab60b60	Transformation, from wetland, inland (non-use)	Recurso	terreno	m2	2,96E-05
c3f83a91-4888-41a4-add9-fd01678a1e5f	Transformation, to annual crop	Recurso	terreno	m2	0,003255
247ddc2a-c861-43be-97f0-0183e3d12f99	Transformation, to annual crop, irrigated	Recurso	terreno	m2	-1,9E-05
c3c3d385-57fa-4d47-a2c5-d838006e7985	Transformation, to annual crop, irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2	2,01E-06
e97b784a-ec09-4b1b-9f14-cc0ce9799c9e	Transformation, to annual crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2	-0,00098
91a067cc-543a-4d73-a0c0-feb1f8935756	Transformation, to annual crop, non-irrigated, extensive	Recurso	terreno	m2	8,53E-07
2e52cbfa-94d7-432b-892f-431daa71a6ef	Transformation, to annual crop, non-irrigated, intensive	Recurso	terreno	m2	-0,01993
2f1e926a-ec96-432b-b2a6-bd5e3de2ff87	Transformation, to arable land, unspecified use	Recurso	terreno	m2	0,003655
54b82481-32a3-4e82-bac7-1df475dbc80c	Transformation, to cropland fallow (non-use)	Recurso	terreno	m2	9,13E-06
90a5a447-af6f-421a-8201-011f07ad1150	Transformation, to dump site	Recurso	terreno	m2	0,000148
d10b390c-9d0c-4f59-b31d-3d0d70e77a35	Transformation, to dump site, inert material landfill	Recurso	terreno	m2	0,000195
8f5c8cb3-dccd-45da-9f1f-d1c61cd789c3	Transformation, to dump site, residual material landfill	Recurso	terreno	m2	7,43E-05
1a568858-efa8-4c2a-b46e-82b6e66b6072	Transformation, to dump site, sanitary landfill	Recurso	terreno	m2	2,92E-06
d73b27a2-81bd-4264-baa5-ce4aca3545be	Transformation, to dump site, slag compartment	Recurso	terreno	m2	1,76E-07
88e8456c-dc23-4bb4-aed5-a4186a2fbf77	Transformation, to forest, extensive	Recurso	terreno	m2	7,22E-06
994d61de-fbb0-4187-a4d4-b11c3c2b9102	Transformation, to forest, intensive	Recurso	terreno	m2	0,007135
bba9f623-5919-4ef3-b98d-c94af1553179	Transformation, to forest, unspecified	Recurso	terreno	m2	0,000332
fe17e7c1-9574-4880-b7e6-ec09c2e3ae5d	Transformation, to grassland, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2	2,39E-06
fd4a4f8e-b620-4df6-92a9-101a251d2f42	Transformation, to heterogeneous, agricultural	Recurso	terreno	m2	0,000738
4624deff-2016-41d4-b2bf-3db8dab88779	Transformation, to industrial area	Recurso	terreno	m2	0,000399
14de323f-9e2d-4beb-b28e-6b93bae98da8	Transformation, to inland waterbody, unspecified	Recurso	terreno	m2	4,77E-10
84b65d8f-2edd-4ddd-8f68-ca28d1c681b0	Transformation, to lake, artificial	Recurso	terreno	m2	0,001587
626915e9-2424-4059-8b6a-fae47161acdf	Transformation, to mineral extraction site	Recurso	terreno	m2	0,006621
7a16b680-6d9a-4db3-a23e-0ec64aca5995	Transformation, to pasture, man made	Recurso	terreno	m2	3,75E-05
7464da86-f239-4bef-a778-04d5818bb956	Transformation, to pasture, man made, extensive	Recurso	terreno	m2	1,94E-11
ec242c43-095c-4b42-8907-e0f13573f0a4	Transformation, to pasture, man made, intensive	Recurso	terreno	m2	2,78E-06
6e02ccfc-9eb5-4a51-be9a-870c1087c833	Transformation, to permanent crop	Recurso	terreno	m2	0,009822
a487b7db-318a-46ff-8e52-2837fab777ad	Transformation, to permanent crop, irrigated	Recurso	terreno	m2	0,000409

Fonte: A autora (2025).

Continua					
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
3f8e24d7-3d44-4a47-870f-9e3e74decca4	Transformation, to permanent crop, non-irrigated	Recurso	terreno	m2	2,03E-08
090e9aa9-a9a9-4878-9634-3ad0ba7fbc91	Transformation, to river, artificial	Recurso	terreno	m2	5,21E-05
9b5b8c40-38fe-42fb-8130-56c15e485fd0	Transformation, to seabed, drilling and mining	Recurso	terreno	m2	0,221392
c7d2cf2d-0d21-45f7-9769-b07f3e53b76a	Transformation, to seabed, infrastructure	Recurso	terreno	m2	4,48E-05
ebb16be1-8db3-42a2-8123-418787422cfe	Transformation, to seabed, unspecified	Recurso	terreno	m2	2,32E-06
9089d7ad-09b1-4174-a188-8844ebde2d5d	Transformation, to shrub land, sclerophyllous	Recurso	terreno	m2	0,000273
0abf9db7-b5a2-4c18-8ec6-aca3a7fb5579	Transformation, to traffic area, rail network	Recurso	terreno	m2	5,56E-06
04eb0695-e67b-46e5-9516-da6bde119822	Transformation, to traffic area, rail/road embankment	Recurso	terreno	m2	0,000148
a42347d2-09f1-405e-95dd-bf6ac03765d8	Transformation, to traffic area, road network	Recurso	terreno	m2	0,000445
512a5356-8059-4772-a43f-42e3c4f3d299	Transformation, to unspecified	Recurso	terreno	m2	0,000197
46cfaeaf-f124-409f-998d-47b159051cec	Transformation, to unspecified, natural (non-use)	Recurso	terreno	m2	1,74E-07
55beee8d-d04e-4307-bb0e-4e113dc07ee7	Transformation, to urban, discontinuously built	Recurso	terreno	m2	1,59E-06
f157b88d-f288-473c-8b03-0f97b58235ff	Transformation, to urban/industrial fallow (non-use)	Recurso	terreno	m2	5,46E-08
d0696f95-6cb3-453b-b849-c99ba9c90c28	Ulexite	Recurso	no solo	kg	1,07E-05
2ba5e39b-adb6-4767-a51d-90c1cf32fe98	Uranium	Recurso	no solo	kg	1,01E-05
c9c4b80a-73dd-415a-92fb-f877595651c1	Vanadium	Recurso	no solo	kg	4,52E-09
f6df5030-8e06-4276-bfeb-219db8dab104	Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	Recurso	no solo	m3	2,29E-08
adb4b590-7fb2-47b6-84e7-d4746a94c7b5	Volume occupied, final repository for radioactive waste	Recurso	no solo	m3	2,92E-09
9a9d71c7-79f7-42d0-af47-282d22a7cf07	Volume occupied, reservoir	Recurso	na água	m3*a	6,710378
8bd1295e-4af1-4177-88a2-6f56ac8e4546	Volume occupied, underground deposit	Recurso	no solo	m3	8,9E-06
fc1c42ce-a759-49fa-b987-f1ec5e503db1	Water, cooling, unspecified natural origin	Recurso	na água	m3	0,634215
31417daa-cd7a-4920-9c73-708b68d494ad	Water, in air	Recurso	no ar	m3	0,018991
1acb026e-9de6-48fe-9e0d-be4d24125bbc	Water, lake	Recurso	na água	m3	0,00416
8c75e7ab-8ab8-41e4-b394-c166ff5b050d	Water, river	Recurso	na água	m3	0,016524
629ffbca-ca71-4e4b-a006-ca9bdd9cd1df	Water, salt, ocean	Recurso	na água	m3	7,638833
79238018-8ec1-4615-9469-2b0df95a43c3	Water, salt, sole	Recurso	na água	m3	0,000261
8c1494a5-4987-4715-aa2d-1908c495f4eb	Water, turbine use, unspecified natural origin	Recurso	na água	m3	29,04022
831f249e-53f2-49cf-a93c-7cee105f048e	Water, unspecified natural origin	Recurso	na água	m3	0,09524

Fonte: A autora (2025).

					Conclusão
Código UUID do fluxo	Fluxo	Categoria	Subcategoria	Unidade	Resultado
2caa889e-8187-459d-963a-fa47a79c5378	Water, unspecified natural origin	Recurso	fossil well	m3	0,052823
478e8437-1c21-4032-8438-872a6b5ddcdf	Water, unspecified natural origin	Recurso	no solo	m3	-0,00491
67c40aae-d403-464d-9649-c12695e43ad8	Water, well, in ground	Recurso	na água	m3	0,011628
bac875f4-75fb-4dde-841a-b07d3a41bcd1	Wood, hard, standing	Recurso	biótico	m3	0,000162
b073ec00-a5bf-4b64-bda0-ef366a3ac9bb	Wood, soft, standing	Recurso	biótico	m3	0,000186
23e83c1f-07c9-4b5f-a898-0f4f09a6691f	Wood, unspecified, standing	Recurso	biótico	m3	9,22E-10
89b567f2-2cab-503e-b796-42cba72fce16	Yttrium	Recurso	no solo	kg	1,45E-09
be73218b-18af-492e-96e6-addd309d1e32	Zinc	Recurso	no solo	kg	0,000995
cd2932c5-a486-4bf1-99b8-815d8a7ce11a	Zirconium	Recurso	no solo	kg	2,73E-07

Fonte: A autora (2025).