



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

PABLO ZAMPROGNO LORENÇÃO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DO VIDRO
SODO-CÁLCICO COM A INCORPORAÇÃO DA LAMA DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Vitória – ES
2022

PABLO ZAMPROGNO LORENÇÃO

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DO VIDRO
SODO-CÁLCICO COM A INCORPORAÇÃO DA LAMA DO
BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Prof.^a D.Sc. Adriana Fiorotti Campos

Coorientador: Prof. Dr Sc. Gilson Silva Filho

Vitória – ES
2022

PABLO ZAMPROGNO LORENÇÃO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DO VIDRO SODO-CÁLCICO COM A INCORPORAÇÃO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração em Sustentabilidade, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa em Gestão Sustentável e Energia.

Aprovada em 21 de fevereiro 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Adriana Fiorotti Campos
Orientadora - PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Gilson Silva Filho
Coorientador - PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Examinador Interno – PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Amaro Olímpio Pereira Júnior
Examinador Externo – PPE / COPPE / UFRJ

Em conformidade com as normas prescritas na Portaria Normativa N^o. 08/2021 – PRPPG/UFES, a assinatura do examinador externo (Prof. D.Sc. Amaro Olímpio Pereira Júnior) foi representada neste documento pela respectiva assinatura da presidente da sessão, Prof^ª. Dr^ª. Adriana Fiorotti Campos. Ato contínuo, a Sr^ª. Presidente da banca examinadora atesta que, a defesa foi realizada por meio de videoconferência, ou outro suporte eletrônico a distância equivalente.

Prof^ª. Dr^ª. Adriana Fiorotti Campos
Orientadora – PPGES / CT / UFES



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ADRIANA FIOROTTI CAMPOS - SIAPE 2564734
Departamento de Administração - DAd/CCJE
Em 08/03/2022 às 11:52

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/372719?tipoArquivo=O>

ASSINATURA

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

GILSON SILVA FILHO
CIDADÃO

assinado em 10/03/2022 08:15:11 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 10/03/2022 08:15:11 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3)
por GILSON SILVA FILHO (CIDADÃO)
Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

A disponibilidade do documento pode ser conferida pelo link: <https://e-docs.es.gov.br/d/2022-HVG4D8>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
EDNILSON SILVA FELIPE - SIAPE 2524538
Departamento de Economia - DE/CCJE
Em 10/03/2022 às 12:07

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/374777?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela minha saúde, pela perseverança ao longo de todo o percurso, por tantas madrugadas, pela fé que Ele me concedeu, por fazer acreditar em mim e nunca desistir independentemente do obstáculo.

À minha mãe Graça e ao meu pai Dimas, por estarem sempre ao meu lado para qualquer desafio e por acreditarem em mim, por me proporcionarem toda a base de amor, humildade, caráter e força para lutar. Amo vocês!

À Thais Cortelete, que me apoiou e incentivou a seguir adiante e por não me deixar desistir. Eu te amo!

À Professora Orientadora D.Sc. Adriana Fiorotti Campos, pelo apoio e colaboração no desenvolvimento da minha dissertação. Sempre com muita atenção, carinho e sugestões me orientando e instigando a buscar os conhecimentos acadêmicos. Muito obrigado!

Ao Professor Coorientador Doutor Gilson Silva Filho, por aceitar o desafio, por toda paciência, presteza e dedicação em responder todos os questionamentos, pela simplicidade e amizade na condução da pesquisa. Muito obrigado!

Ao Centro Universitário São Camilo, que disponibilizou de toda sua estrutura de laboratórios e equipe técnica para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

À AAMOL, por ter permitido nossa entrada na associação para coleta da LBRO. Especialmente ao diretor Fabrício, pelo fornecimento de dados de resíduos disponibilizados na AAMOL.

À FAPES, pelo fomento à pesquisa por meio do Termo de Outorga 191/2017, processo nº 80707734; e Termo de Outorga 580/2018, processo nº 84303921.

Aos membros da banca, Professor D. Sc. Ednilson Silva Felipe e Professor Doutor Amaro Olímpio Pereira Júnior por terem aceitado o convite e pelas contribuições pertinentes a esta pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho, que me apoiaram nos meus estudos e incentivaram a encarar esse desafio.

Aos meus professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, por todas as discussões, debates e ensinamentos que fizeram ampliar minha formação acadêmica e profissional.

Aos meus colegas de mestrado da turma de 2019, pela oportunidade de aprender juntos, por conhecer tantas histórias de vida diferentes e por ampliar a minha forma de pensar sobre o mundo. Em especial, à Joanna Wetler, Florene Tavares e Flávia Borel, com quem tive a oportunidade de estudar e compartilhar angústias, preocupações e alegrias. Vocês foram importantes. Muito obrigado!

“Tudo o que fizer, faça em nome de Jesus”.

(Colossenses 3:17).

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais movimenta grande volume de matérias primas em seu processo produtivo, gerando diversos resíduos, como a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO). Alternativas devem ser buscadas para a reciclagem e tratamento dos resíduos de rochas ornamentais. A incorporação da LBRO em materiais da construção civil vem sendo consideravelmente investigada para avaliar seu comportamento nas propriedades químicas e físicas, como por exemplo na produção de vidro sodo-cálcico. Entretanto, pesquisas quanto a avaliação ambiental de seu uso, ainda precisam ganhar maiores proporções, principalmente no Brasil. Metodologias como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) podem ser aplicadas na verificação dos potenciais impactos ambientais associados a mudança na composição do produto. Desta forma essa dissertação tem por objetivo realizar uma ACV de modo a avaliar a viabilidade ambiental do vidro sodo-cálcico com incorporação de LBRO para um cenário brasileiro. Foi utilizado o programa computacional OpenLCA 1.10.3 para realizar uma avaliação em conjunto com dados obtidos em observações em laboratório e visita técnica, de outras literaturas e também do banco de dados Ecoinvent 3.6, para avaliação dos impactos ambientais (AICV), utilizou-se dos métodos CED, IPCC 2013 e o Impact+2002. A partir dos resultados, o vidro sodo-cálcico com substituição da areia industrial (sílica) por LBRO apresentou uma redução no consumo de energia, nas emissões de CO₂ eq e no impacto total quando comparados com o vidro sodo-cálcico convencional, tornando-se uma substituição vantajosa ambientalmente. Por todas essas razões, o estado do Espírito Santo tem potencial para a instalação de uma fábrica de vidro.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO); Vidro Sodo-cálcico; Reutilização de Resíduos; Matéria-prima na Indústria de Vidro; Economia Circular.

ABSTRACT

The ornamental stone industry mobilizes large volumes of raw materials in its production process, generating various types of waste, such as the Ornamental Stone Processing Sludge (SOSP). Alternatives must be sought for the recycling and treatment of waste from ornamental rocks. The incorporation of SOSP in civil construction materials has been considerably investigated to evaluate its behavior in chemical and physical properties, as for example in the production of soda-lime glass. However, research on the environmental assessment of its use still needs to gain greater proportions, especially in Brazil. Methodologies such as Life Cycle Assessment (LCA) can be applied to verify the potential environmental impacts associated with changes in product composition. Thus this dissertation aims to perform an LCA in order to evaluate the environmental viability of soda-lime glass with the incorporation of SOSP for a Brazilian scenario. The computer program OpenLCA 1.10.3 was used to perform an evaluation in conjunction with data obtained from observations in the laboratory and technical visit, from other literature, and also from the Ecoinvent 3.6 database. For the environmental impact assessment (EIA), the CED, IPCC 2013, and Impact+2002 methods were used. From the results, soda-lime glass with replacement of industrial sand (silica) by SOSP showed a reduction in energy consumption, CO₂ eq emissions and total impact when compared to conventional soda-lime glass, making it an environmentally advantageous replacement. For all these reasons, the state of Espírito Santo has potential for the installation of a glass factory.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Sludge from Beneficiation of Ornamental Rocks (SOSP); Soda-lime Glass; Waste Reuse; Raw Material in the Glass Industry; Circular Economy.

LISTA DE SIGLAS

AAMOL – Associação Ambiental Monte Líbano

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A-ACV – Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ACCV – Avaliação de Custo de Ciclo de Vida

ACV-O – Avaliação Organizacional do Ciclo de Vida

ACV-Social – Avaliação Social do Ciclo de Vida

ASCV – Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

APC – Análise de Pontos Críticos

CCV – Custeio do Ciclo de Vida

CEA – Contas Econômicas Ambientais

CED – *Cumulative Energy Demand*

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP – Conferências das Partes

DQG – Objetivo da Qualidade dos Dados

DRX – Difração de Raios X

GTP – *Global Temperature change Potential*

GWP – *Global Warming Potential*

GEE – Gases de Efeito Estufa

ISO – *International Organization for Standardization*

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LBRO – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

LCA – *Life Cycle Assessment*

MCMV – Minha Casa Minha Vida

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MEE – Medidas de Eficiência Energética

MLM – Modelagem Multinível

MP – Matriz *Pedigree*

NCE – Nova Economia Climática

NBR – Norma Técnica Brasileira

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PCV – Pensamento do Ciclo de Vida

PIB – Produto Interno Bruto

PNH – Política Nacional de Habitação

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCB – Rochas Carbonáticas Brutas

RCD – Resíduos da Construção Civil e Demolição

RP – Rochas Processadas

RSB – Rochas Silicáticas Brutas

SCEA – Sistema de Contas Econômicas Ambientais

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SOSP – *Sludge from Beneficiation of Ornamental Rocks*

UNEP – *United Nations Environment Programme*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Série Histórica Anual das Emissões de GEE no Brasil, por Setor, de 1990 a 2016, em Dióxido de Carbono Equivalente (CO ₂ eq) (GWP SAR – 100 anos).....	22
Figura 2 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030	28
Figura 3 – Cadeia Produtiva do Vidro.....	37
Figura 4 – Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida.....	40
Figura 5 – Demonstrativo de Fluxos de Entrada e Saída para um Processo de ICV.....	41
Figura 6 – Elementos de uma AICV	43
Figura 7 – Estrutura de Avaliação de Impacto da AICV.....	44
Figura 8 – Principais Ferramentas do Ciclo de Vida.....	53
Figura 9 – Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV).....	55
Figura 10 – Síntese dos Procedimentos Metodológicos Adotados nesta Dissertação.....	62
Figura 11 – Fronteira do Sistema	70
Figura 12 – Amostras de RQ e LBRO após Tratamento.....	72
Figura 13 – Ciclo de Vida da LBRO na AAMOL.....	73
Figura 14 – Amostras de CaCO ₃ e MgCO ₃	76
Figura 15 – Municípios de Acordo com Macrorregiões de Planejamento do Espírito Santo ..	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ranqueamento dos Estados Brasileiros Exportadores de Rochas Ornamentais em 2020	31
Gráfico 2 – Resíduos Gerados por Processos em uma Indústria de Mármore e o Montante de Perdas da Matérias-primas na Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais	35
Gráfico 3 – Composição do Vidro Sodo-cálcico.....	36
Gráfico 4 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório pelo Método CED.....	82
Gráfico 5 – Resultados dos Impactos Ambientais do Método CED por Fonte de Energia para a Produção do Vidro LBRO	83
Gráfico 6 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório pelo Método Impact 2002+	84
Gráfico 7 – Resultados do Método Impact 2002+ dos Processos da Produção do Vidro LBRO em Laboratório – Categoria Midpoint (Normalizado)	86
Gráfico 8 – Resultados dos Impactos Ambientais do Método CED por Fonte de Energia para a Preparação e Tratamento da LBRO.....	88
Gráfico 9 – Resultado dos Impactos Ambientais do Método IPCC 2013 por Fonte de Energia para a Preparação e Tratamento da LBRO	89
Gráfico 10 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – método Impact 2002+	90
Gráfico 11 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – método CED.....	93
Gráfico 12 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – Impact 2002+	93

Gráfico 13 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – IPCC 2013	96
Gráfico 14 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – Método CED por Fonte de Energia	97
Gráfico 15 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – Método CED.....	98
Gráfico 16 – Resultados dos Impactos Endpoint da Comparação entre Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – método Impact 2002+ (normalizados).....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Normas Técnicas Brasileiras de Referência (NBR) Aplicáveis aos Resíduos	34
Quadro 2 – Possíveis Destinações e Uso de Resíduos de Indústrias de Pedras	34
Quadro 3 – Matéria-prima e suas Funções na Vitriificação	36
Quadro 4 – Normalização da Avaliação do Ciclo de Vida.....	39
Quadro 5 – Escopo do Projeto da Avaliação do Ciclo de Vida.....	41
Quadro 6 – Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida x Abrangência de Caracterização	45
Quadro 7 – Características do Método AICV Impact 2002+	48
Quadro 8 – Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos (Prós x Contra)	50
Quadro 9 – Características do Banco de Dados Ecoinvent	50
Quadro 10 – Alguns Momentos da ACV no Brasil.....	52
Quadro 11 – Indicadores Econômicos.....	54
Quadro 12 – Indicadores Sociais	55
Quadro 13 – Matriz Pedigree.....	59
Quadro 14 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Não Realizaram ACV	63
Quadro 15 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Realizaram ACV	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representatividade do ES nas Exportações de Rochas Ornamentais no Mês de Novembro nos Anos 2019 a 2021	31
Tabela 2 – Estimativa de Emissões de CO ₂ do Ferro, Areia, Brita e Rochas Ornamentais	32
Tabela 3 – Composição das Misturas dos Vidros Sodo-cálcico (em g)	68
Tabela 4 – Distância de Transporte dos Materiais para Produção do Vidro tendo Diferentes Pontos de Origem da LBRO	80
Tabela 5 – Distância de Transporte da LBRO tendo como Referência uma Fábrica no ES e outra em MG	80
Tabela 6 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório em cada Categoria de Impacto do Método IMPACT 2002+ (Single Score)	85
Tabela 7 – Resumo: Anova: fator único dos resultados do Gráfico 7	87
Tabela 8 – ANOVA	87
Tabela 9 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) - método IPCC 2013 .	91
Tabela 10 – Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes	92
Tabela 11 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o Laboratório e da Areia Industrial (sílica) - Diferentes Categorias – Impact 2002+	94
Tabela 12 – Resultado da Análise de Sensibilidade dos Impactos Ambientais do Tratamento e do Transporte da LBRO e do Beneficiamento e Transporte da Areia Industrial (Sílica) até a Fábrica de Vidro em Jacutinga/MG	95
Tabela 13 – Resultados dos Impactos Midpoint da Comparação entre Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – método Impact 2002+ (normalizados)	98
Tabela 14 – Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes	99

Tabela 15 – Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida.....	100
--	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	22
1.2	OBJETIVOS	29
1.2.1	Objetivo geral	29
1.2.2	Objetivos específicos.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	RELEVÂNCIA DO MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	30
2.2	LEGISLAÇÃO E USO DE RESÍDUOS	33
2.3	VIDRO	35
2.3.1	Características gerais e composição.....	35
2.3.2	Cadeia Produtiva	36
2.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	38
2.4.1	Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida.....	40
2.4.2	Softwares de ACV	49
2.4.3	ACV no Brasil.....	51
2.4.4	Ferramentas, limitações e riscos da metodologia ACV.....	52
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	61
3.1.1	Resíduos de rochas e outros minerais.....	63
3.1.2	Metodologia ACV	65
3.1.3	Softwares e banco de dados	66
3.1.4	Métodos de AICV	66
3.2	PESQUISA DE CAMPO	68
3.2.1	Inventário do ciclo de vida dos materiais.....	68
3.2.2	LBRO e RQ.....	71
3.2.3	Sílica (SiO ₂).....	74
3.2.4	Carbonato de Sódio (NaCO ₃)	74
3.2.5	Carbonato de Cálcio (CaCO ₃)	76
3.2.6	Carbonato de Potássio (K ₂ CO ₃)	76
3.2.7	Carbonato de Magnésio (MgCO ₃).....	77
3.2.8	Demais matérias e carbonatos utilizados	77
3.2.9	Caraterização e definição do cenário para simulação da ACV.....	78

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO VIDRO COM A LBRO	81
4.2	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DA LBRO	88
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO ÀS DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE	90
4.3.1	Aquecimento global (kg CO ₂ eq., método IPCC 2013)	91
4.3.2	Energia incorporada (MJ eq, método CED)	92
4.3.3	Impacto total (mPt, método Impact 2002+)	93
4.3.4	Análise de sensibilidade do transporte da LBRO tratada em Cachoeiro de Itapemirim/ES até a indústria de vidro em Jacutinga/MG	94
4.4	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DO VIDRO M1 (LBRO) E M2 (AREIA INDUSTRIAL (SÍLICA))	95
5	CONCLUSÕES	101
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICES	124
	ANEXOS	133

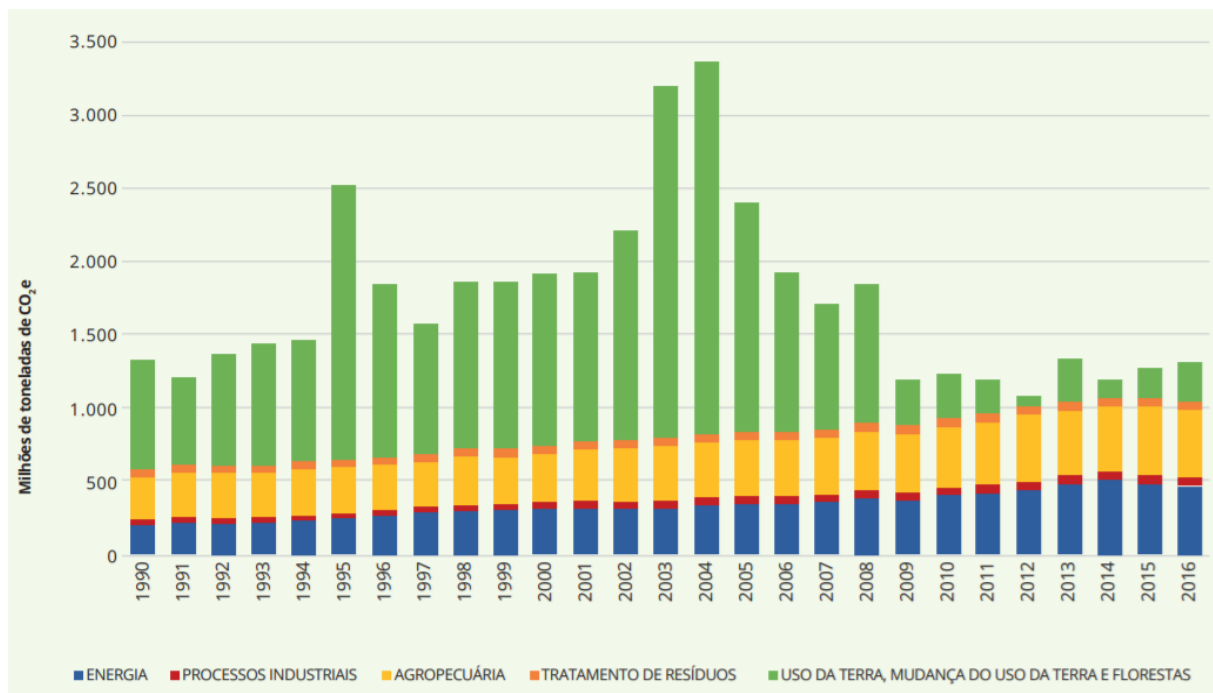
1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

A discussão sobre os impactos ambientais, vem ganhando relevância e entre alguns motivos está o plano de ação da Agenda 2030, onde foram elaboradas 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e 169 metas, para que o planeta e o que nele está inserido, como pessoas, cidades e países, desenvolvam ações até o ano de 2030 na busca por minimizar, por exemplo, o esgotamento dos recursos naturais, a pobreza, além de promover uma atividade econômica amplamente sustentável (ONU 2021).

Um dos aspectos causadores de impactos ambientais são as atividades produtivas que emitem Gases Efeito Estufa (GEE). Analisando as séries históricas do Quarto Relatório de Atualização Bienal do Brasil de 2020 sobre mudanças do clima, o setor de Energia (atividades de queima de combustível, mineração de carvão fóssil, extração e transporte de petróleo e gás natural) e o setor de Agropecuária, possuem maior participação nas emissões de CO₂, ficando à frente do setor de Processos Industriais (produção de cimento, cal, amônia, ferro gusa e aço, alumínio e outras indústrias), como podem ser observados na Figura 1 (MCTIC, 2020).

Figura 1 – Série Histórica Anual das Emissões de GEE no Brasil, por Setor, de 1990 a 2016, em Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂ eq) (GWP SAR – 100 anos)



Fonte: MCTIC (2020).

De acordo com o relatório de Resultado de Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa de 2021, o estado do Espírito Santo apresentou em 2016 (ano

exercício mais atualizado do relatório), um valor de emissões e remoções de 32.894 Gigagramas (Gg) de gás carbônico equivalente (CO₂ eq), tendo como principais responsáveis, os setores de Energia, Processos Industriais e Agropecuária, respectivamente com 46%, 36% e 14%. De acordo com o relatório, o estado apresentou um aumento de 36,42% nas emissões no período de 2010 a 2016 (de 24.113,26 Gg CO₂ eq para 32.894,24 Gg CO₂ eq), esses valores representam 2% das emissões nacionais e 9% em relação aos demais estados da região Sudeste (MCTIC, 2021).

Avaliando as atividades do setor de construção civil global, em 2018, consumiu 125 Exajoule (EJ), o que representa 36% do uso de energia final e emitiu 11 gigatoneladas de dióxido de carbono (GtCO₂), representando 39% das emissões globais de CO₂, destes, 11% foram somente para os processos para obtenção do aço, cimento e vidro (UNEP, 2019). Comparando os resultados de 2019 com o de 2020 para a obtenção desses materiais, teve uma queda de 12,5% (UNEP, 2021a).

Quanto as emissões de CO₂, provenientes ao uso de energia em edificações, em 2019 foi aproximadamente 10 GtCO₂. Com isso, 28% do total das emissões globais de CO₂ estão relacionadas com a energia (UNEP, 2020). No relatório de 2021, devido à pandemia da COVID-19¹ e as séries de medidas de isolamento por vários meses, boa parte das atividades foram interrompidas, o que ocasionou em 2020 uma redução de 4% em relação ao ano anterior (UNEP, 2021a).

No entanto, além do impacto da pandemia, outras medidas estão sendo adotadas em atendimentos, por exemplo, para alcançar os objetivos do Acordo de Paris, o que resultou quando comparados os dados do ano de 2015 com 2020 para o setor da construção civil, a redução em 17,2% das emissões em KgCO₂/m², já o setor de energia, a redução foi de 5,7%. Uma das principais mudanças do setor da construção nesse mesmo período de comparação, foi o aumento 39,5% nos investimentos para tornar-se mais sustentável (UNEP, 2021a).

Estudos preliminares apontam, que o segmento de vidro no Brasil, emite por tonelada de vidro plano (*float*) e vidro impresso, 0,614 tCO₂ eq e 0,569 tCO₂ eq, respectivos. Quando comparados com a produção europeia, dados de 2010, o Brasil emitia respectivamente 12% e 38% de tCO₂eq. a menos (MMA, 2013).

¹Pandemia mundial decretada em 11 de março de 2020 pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Trata-se de uma pneumonia grave de etiologia com presença do coronavírus (SARS-CoV-2), identificado como agente causador da doença COVID-19.

Não se pode negar, também, que a diferença de grandeza em relação as emissões do Brasil com a de outros países de potencial econômico, como os Estados Unidos da América. De acordo com as emissões históricas globais de GEE de 2018, entre Brasil e EUA, do setor de energia e seus subsetores (Construção, Eletricidade/Calor, Fabricação/Construção e Transporte), os Estados Unidos emite de GEE quase 13 vezes a mais que o Brasil, respectivamente 4870 Megatoneladas (Mt) e 387 Mt de GEE (WRI, 2021).

De acordo com o II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral brasileiro, um estudo sobre os impactos produzidos por uma grande empresa do segmento de areia e com base no escopo 2², o total de emissão foi de 690.923 tCO₂ eq., sendo o mineral com o maior nível de impacto ambiental para emissões de GEE quando comparado com outros 15 minerais, entre eles, as Rochas Ornamentais, que na mesma pesquisa, teve como total de emissão 114.672 tCO₂ eq. (IBRAM, 2014).

Como foi dito, as emissões de GEE estão atreladas com a extração de recurso natural, contudo, sem esses recursos não existem insumos para a transformação da matéria-prima em produtos de uso e consumo para as atividades humanas, como: petróleo para combustíveis, carvão para motores à combustão, ferro para estruturas metálicas, alumínio para vedações, areia para produção de vidro, entre outros insumos naturais finitos no meio ambiente, necessários para a sociedade, que geram, além da sua escassez, resíduos (MILLER, 2015).

Os impactos causados pelas ações antrópicas, como o desmatamento de mata verde, enchentes nas áreas urbanas, poluição de rios, ciclones tropicais, altas temperaturas, entre outros), podem acarretar riscos ambientais que acabam bloqueando acesso aos recursos indispensáveis para segurança e vida humana (ROSA; SILVA; COSTA, 2021). A atividade artesanal tende a ter uma linha de produção com menos equipamentos e, conseqüentemente, um gasto energético inferior. Outro ponto característico, é que a demanda fica na mesma localidade dos produtores, como: doces caseiros, peixes, cerveja e cachaça artesanal. Já a industrial com a possibilidade de um centro de distribuição, um determinado produto pode ser transportado para diversas regiões de diferentes distâncias, o que demanda um consumo maior de combustível (NIGR *et al.*, 2015).

Boa parte dos segmentos industriais geram resíduos e emitem GEE. Na realidade, o que ocorre é que nem todo segmento industrial possui uma gestão equilibrada quanto as emissões. Dessa

² Emissões indiretas de GEE por uso de energia: emissões de GEE provenientes da geração de energia adquirida de terceiros, mas consumida pela empresa (comprada ou trazida para dentro dos limites organizacionais da empresa) – eletricidade e/ou vapor (IBRAM, 2014).

forma, a contribuição negativa que uma indústria pode causar em uma determinada localidade é significativa, tornando uma comunidade menos sustentável, visto que pode impactar negativamente nos três vieses da sustentabilidade: ambiental, social e econômico (MIRABELLA; ALLACKER; SALA, 2019).

Apesar da situação econômica e da saúde pública mundial, por conta da COVID-19, diversos segmentos industriais da construção civil tiveram uma ascensão, por exemplo, o cimento, de acordo com os Resultados Preliminares de Novembro 2021, do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o aumento das vendas de cimento no Brasil foi de aproximadamente 7% no período de janeiro a novembro de 2021 em relação ao ano anterior (SNIC, 2021). No Relatório Anual de 2020 do mesmo sindicato, aponta que no ano de 2020, a indústria do cimento teve um crescimento na produção, vendas internas e exportações em comparação ao ano de 2019, em 8%, 11% e 93% respectivamente (SNIC, 2020).

O setor de rochas ornamentais, manteve em 2020 os mesmos patamares de produção de 2019 e 2018 (ABIROCHAS, 2021). Contudo, de janeiro a novembro de 2021, o Brasil faturou com as exportações de blocos de mármore e de granito, aproximadamente, 81% e 36% a mais em relação ao mesmo período do ano anterior. Em 2021, o Brasil faturou no mesmo período, mais que nos últimos seis anos (SINDIROCHAS, 2021). Já os setores de minério de ferro, cobre e calcário dolomítico, faturaram aproximadamente no terceiro trimestre de 2021, 167%, 43% e 73% a mais, quando comparados ao terceiro trimestre de 2020 (IBRAM, 2021).

Para o segmento de vidros, em 2020, a produção geral de vidro processados subiu aproximadamente 15%, tendo o vidro temperado e o espelho, 17% e 20% respectivos, responsáveis por alavancar a produção de vidro processados. No geral, a indústria do vidro em 2020 obteve uma variação de aumento do faturamento em 12% quando comparados com 2019 (ABRAVIDRO, 2021).

Quando comparados os dados do PIB de outros segmentos industriais com os segmentos da indústria da construção civil, comentado nos parágrafos anteriores, o único setor que teve resultado positivo em relação as demais atividades industriais, obtendo um crescimento no resultado terceiro trimestre do PIB 2021 em 3,9%, quando comparados com o terceiro trimestre de 2020 (IBGE, 2021), foi a construção civil (vidros, minérios, entre outros). Portanto, essa importante atividade industrial do Brasil, para atingir esses patamares, além de outros fatores, como, o aumento do preço dos produtos, está na capacidade de produção do país. Com isso, são necessárias mais extrações de recurso natural, demanda de energia, combustível, conseqüentemente emissões de GEE e a geração de resíduos.

Esses recursos naturais extraídos, por exemplo, o mármore e o granito, de acordo com Singh e outros (2017), geram ao longo do beneficiamento, resíduos, estes quando maldispostos e permanecendo expostos por tempo indeterminado, acarretam problemas como a contaminação dos solos, afetando reservas de água, podendo prejudicar o entorno do ambiente, interferindo na agricultura e, como consequência, na saúde humana.

Para Brandt (2012), é necessária a criação de políticas públicas mais eficientes quanto ao uso de recursos naturais. Uma sugestão seria incluir na concepção do projeto de construção civil, estudos quanto aos impactos ambientais que esse novo empreendimento poderá causar no entorno. Estimulando assim, o uso e seleção de material mais apropriado ou até mesmo reciclado para cada tipo de construção, gerando menos impacto e mantendo o lucro.

De maneira geral, a indústria da construção civil ergueu uma grande quantidade de novos edifícios e condomínios. Para isso, extraiu, processou matéria-prima e gerou um grande volume de resíduos e emissões. Yu e outros (2020) levantaram a importância de quantificar as emissões de GEE incorporadas nas edificações por conta dos diferentes materiais utilizados a fim de buscarem as opções de menor impacto, como o reaproveitamento de resíduos reciclados.

O reaproveitamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) têm se tornado uma prática nos tempos atuais. Exemplo disso, são as obras de pavimentação e rodagem, que, em alguns casos passaram a utilizar em camada de base e sub-base de pavimento, argamassa ou concretos verdes, onde foi adotado na produção dos mesmos, a substituição parcial do cimento pelo o resíduo de cerâmica vermelha (LORENÇÃO; SILVA, 2018).

O RCD tem sido, de fato, uma alternativa de produtos mais sustentáveis, apesar de sua aplicação final está geralmente associadas aos serviços da construção civil, como a pavimentação (SILVA; BRITO; DHIR, 2019). Em relação a estudos que viabilizam ou não o uso de determinado RCD, Celik e outros (2015) concluíram que é viável, de acordo com as propriedades mecânicas, o uso dos concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos, sendo um deles o resíduo do vidro, sendo compatível quanto a durabilidade do concreto e apresentou menor impacto ambiental entre os demais concretos estudados.

O vidro é um item utilizado em todos os segmentos industriais e não industriais, seja em fachadas de uma edificação, em copos, garrafas e com variações de cores. Possuem diversas vantagens como sua durabilidade, transparência, capacidade de armazenamento e confinamento de líquidos, entre outros. Quanto a durabilidade, é importante reforçar, que em algumas fontes, o tempo de degradação natural do item chega a ser impossível de determinar, quanto ao lado

positivo é que o vidro pode ser 100% reciclado (ANAVIDRO, 2020). Em relação a sua fabricação, pode-se fazer uso de recursos provenientes da natureza, químicos ou de resíduos de outras indústrias, tal como o das rochas ornamentais (ALEIXO et al., 2016).

Aleixo e outros (2016) falam das vantagens em utilizar os resíduos provenientes de vários setores industriais na fabricação de vidros, sendo uma alternativa para destinar e agregar valor econômico para tais resíduos, como as cinzas de incineradores de lixo, cinzas de termelétricas, cinzas de bagaço de cana de açúcar, cinzas de carne e ossos, escórias, extração de minérios, galvanoplastia, rejeito de porcelana de lítio, restos de comida, carepa de aço, lã de vidro, fibra de vidro, bem como, a casca de arroz, como fonte de sílica, tornando assim um possível substituto da sílica na (ORYZASIL, 2021).

Nesta pesquisa, o foco foi direcionado ao processo de reaproveitamento da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) para produção de vidro. O vidro produzido com a incorporação de LBRO obteve indicadores de qualidade como a resistência hidrolítica, densidade e dureza superiores quando comparados com vidros produzidos com outros resíduos, também aos vidros convencionais, que têm a areia como o principal insumo, sendo assim, uma alternativa na construção civil. Já os indicadores de densidade e capacidade de redução de calor, os resultados encontrados foram semelhantes ao de vidros convencionais, além disso, destaca-se também os vidros produzidos com a coloração âmbar, mostrando-se adequado para o envasamento de medicamentos e bebidas, visto sua capacidade de bloquear a passagem de radiação solar (BASTOS, 2018).

Mostra-se no mínimo oportuno promover tal discussão e buscar metodologias que verifiquem a viabilidade ambiental, ou seja, que realizem uma análise minuciosa da utilização de resíduos na cadeia produtiva de um novo produto ancorados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (DHALIWAL et al., 2014).

A ACV, desenvolvida em distintos países, é uma metodologia que através de uma ferramenta computacional, torna-se capaz de analisar os aspectos ambientais e aferir a potencialidade dos impactos ambientais de um determinado produto ao longo do seu ciclo de produção, ou de vida (ABNT, 2009a). Esta metodologia vem sendo adotada por muitos projetistas de edificações como um instrumento de tomada de decisão e escolha de materiais para uma construção sustentável (CHAU; LEUNG; NG, 2015).

Pode-se através da ACV, analisar todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou delimitar a fronteira do sistema, ou seja, até qual etapa do ciclo de vida será realizada a avaliação. Uma

das fronteiras adotadas em pesquisas de ACV é a “*cradle to cradle*”, também conhecida na literatura como fronteira de sistema do berço ao berço, indica que serão analisados no ciclo de vida do produto, os processos desde a extração da matéria-prima até a etapa do reemprego do resíduo no ciclo de produção (HINZ; VALENTINA; FRANCO, 2008).

A ACV pode ser adotada como uma ferramenta de avaliação de sustentabilidade capaz de suprir a deficiência de informação de um determinado produto ou serviço em relação ao seu perfil ambiental. Esses dados são necessários e auxiliam os gestores das empresas, na escolha de um produto a outro e até mesmo como uma sugestão para rotulagem ambiental dos produtos (ABNT, 2009a).

Ao analisar os processos do ciclo de vida de um produto, é possível identificar em qual processo tem-se o maior impacto ambiental, qual emite mais GEE ou o que gera mais resíduos. Dessa forma, por exemplo, a ACV permite que uma empresa tenha a visão como um todo do ciclo de vida de um produto e análises de possíveis reformulações e melhorias, buscando assim, o desenvolvimento de um produto mais competitivo e sustentável (WILOSO *et al.*, 2019).

A justificativa desta dissertação está em consonância com que tem sido discutido nas conferências internacionais promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), como a importância do Desenvolvimento Sustentável e estratégias para minimizar os impactos ambientais no mundo inteiro. Na Figura 2 são apresentados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável que tem como uma das metas global, proteger o meio ambiente e o clima.

Figura 2 – Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030



Fonte: ONU (2021).

Pesquisas que avaliem os impactos ambientais no contexto de Avaliação do Ciclo de Vida de produtos, com a incorporação de resíduos, tornam-se um caminho na busca pelo Desenvolvimento Sustentável e pela retomada da economia.

Assim, este estudo adotou a utilização exclusiva de resíduos de rochas ornamentais para produção de vidros sodo-cálcicos com viabilidade técnica já comprovada por Bastos (2018). Salienta-se e que a verificação da viabilidade ambiental desse produto ainda não foi realizada, com base neste ponto, foi adotado como objeto de estudo desta dissertação, verificar se os impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida de produção de vidro com o LBRO são ambientalmente preferíveis como uma solução alternativa ou se degrada igual ou mais ao meio ambiente do que a produção do vidro com a matéria-prima convencional.

Este projeto é motivado pela necessidade em aprofundar estudos sobre a incorporação de resíduos para produção de outro produto e alavancar o desenvolvimento urbano sustentável onde engloba uma relação equilibrada entre as três áreas: social, econômica e ambiental (BIZI, 2011). Exemplo disso, é a produção de produtos com uso otimizado dos recursos naturais e reaproveitando os resíduos sem perder a qualidade.

A problemática que se coloca nesta dissertação é: Como estimar e analisar os impactos ambientais da produção de vidro sodo-cálcico com a incorporação da LBRO com o conceito de ciclo de vida, utilizando a metodologia de ACV para fazer comparações em um cenário específico?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é apresentar uma Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida do vidro sodo-cálcico com a incorporação da LBRO.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Identificar os processos mais impactantes da ACV na produção do vidro sodo-cálcico com LBRO;
- Analisar e comparar o ciclo de vida do vidro sodo-cálcico com LBRO e do vidro sodo-cálcico com areia industrial (sílica).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RELEVÂNCIA DO MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais têm uma forte conexão com o setor da construção civil, sendo utilizadas em revestimentos na parte interna ou externa das edificações. Na ABNT NBR nº 15012/2013, as rochas ornamentais são definidas como “material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética em uma edificação”.

Existem processos para escolha das rochas ornamentais de acordo com sua finalidade, uso pretendido (pisos, paredes, fachadas, escadas, revestimentos, peças e acabamentos de lavatórios, em passeio público, calçadas, em escadas, concreto ornamental, bancadas, pias, mesas), além da finalidade, também são verificados os aspectos estéticos conforme os tipos de rochas, considerando as propriedades físicas, ensaios de alteração e propriedades mecânicas (FRASCÁ, 2014).

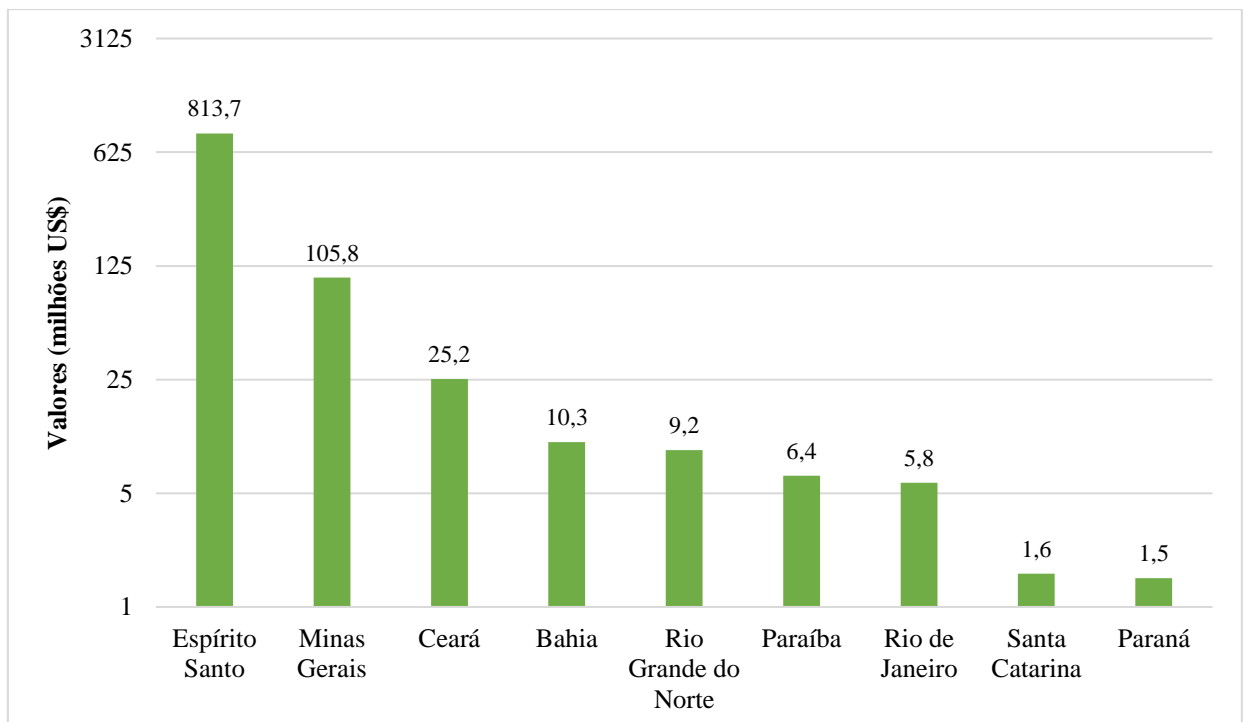
A indústria de rochas ornamentais tem uma boa representatividade na economia brasileira. De acordo com o Relatório de Balanço de Exportações de Rochas de 2021 (de janeiro a novembro), o segmento registrou US\$ 1,22 bilhões e 2,21 bilhões de toneladas referente as exportações de todos os tipos e formatos de rochas. Tendo um aumento de faturamento e na produção, no mesmo período do ano anterior em 36,20% e 12,32%, respectivamente (SINDIROCHAS, 2021).

De acordo com o Relatório de Análise de Competitividade do Setor das Indústrias de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo 2020 do Programa de Desenvolvimento e Proteção à Economia do Estado do Espírito Santo (Compete-ES), o saldo líquido de empregos formais no ES foi de 19,5 mil celetistas em 2019, um aumento de quase 10% em relação ao ano anterior. Já em relação as empresas participantes do programa, a evolução de emprego foi de 4,1% do ano de 2017 para 2018 e 5,1% para o ano de 2019 (IDEIES, 2020).

Na Tabela 1, mostra-se o resumo das exportações de rochas ornamentais fazendo uma comparação do mês de novembro nos anos de 2019 a 2021 e a representatividade do estado do Espírito Santo (ES). Em relação aos dados da Tabela 1, no mês de novembro de 2021, o Brasil faturou US\$ 138.239.459 em suas exportações de rochas ornamentais. O ES sozinho faturou em US\$ 117.146.395, tendo o município de Serra/ES (US\$ 35.516.793), de Cachoeiro de Itapemirim/ES (US\$ 31.602.084) e de Barra de São Francisco/ES (US\$ 17.038.932),

respectivamente, como os que mais faturaram no estado (SINDIROCHAS, 2021). Esses valores colocam o município de Serra/ES (25,69%), Cachoeiro de Itapemirim/ES (22,83%) e de Barra de São Francisco/ES (12,33%), sendo responsáveis por 60,88% da participação nas exportações do Brasil. Os demais estados, Minas Gerais, Ceará, Bahia e Rio Grande do Norte representam 9,7%, 2,2%, 0,9% e 0,6% respectivamente (SINDIROCHAS, 2021). No Gráfico 1, destacam-se os principais estados exportadores de rochas ornamentais do Brasil do ano de 2021 (janeiro a novembro).

Gráfico 1 – Ranqueamento dos Estados Brasileiros Exportadores de Rochas Ornamentais em 2020



Fonte: Adaptado de SINDIROCHAS (2021).

Destaca-se conforme dados da Tabela 1, o ES teve um aumento de cerca de 40% tanto na produção, quanto nos valores em dólares das exportações de rochas ornamentais de novembro de 2020 com novembro de 2021.

Tabela 1 – Representatividade do ES nas Exportações de Rochas Ornamentais no Mês de Novembro nos Anos 2019 a 2021

Participação	Nov/2019		Nov/2020		Nov/2021	
	Em US\$	Em Tonelada	Em US\$	Em Tonelada	Em US\$	Em Tonelada
Brasileira	73.568.387	159.847	100.275.830	165.323	138.239.459	221.772
Capixabas	60.778.881	125.790	82.830.133	124.054	117.146.395	172.914
Participação do ES	82,62%	78,68%	82,60%	75,04%	84,74%	77,97%

Fonte: Adaptado de SINDIROCHAS(2020); SINDIROCHAS (2021).

Considerando que cerca de 41% evidenciado no trabalho de Bastos (2018) são resíduos do beneficiamento, as 172.912 toneladas de rochas ornamentais produzidas pelo ES, representam 70.894,74 toneladas de resíduos no seu beneficiamento. Contudo, outros autores consideram cerca de 30%, gerando então, 51.874,20 toneladas de resíduos de beneficiamento para produção de 172.914 toneladas de rochas ornamentais. Campos (2014), apontou que da lavra ao beneficiamento se tem 83% de resíduos, ou seja, 145.247,76 toneladas para a quantidade produzida só em novembro de 2021.

De acordo com Chiodi-Filho (2021), os destinos das rochas ornamentais brasileiras (em sua maioria produzida, pelos estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Ceará) em 2020, foram os EUA, China, Itália e México.

Comparando o setor de rochas ornamentais com outros setores minerais, de acordo com o II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral, as três substâncias que mais tiveram movimentação bruta (ROM³) são em 10³ t: 1º - Ferro (519.300); 2º - Areia (246.772); e em 3º - Pedra britada (268.000), em 8º lugar aparece as Rochas Ornamentais com 23.435 (10³ t) (IBRAM, 2014).

É preciso lembrar, que a cadeia produtiva da indústria de rochas ornamentais não contempla apenas a extração e o corte das rochas, mas tudo o que envolve a indústria, como há necessidade de fabricação de máquinas, veículos pesados, galpões, terrenos e demanda por energia e água. Assim, se justifica avaliar os resíduos e gases tóxicos gerados por esse setor industrial. Na Tabela 2, mostra-se as estimativas de emissões CO₂ para alguns minerais adotados na construção civil.

Tabela 2 – Estimativa de Emissões de CO₂ do Ferro, Areia, Brita e Rochas Ornamentais

Estimativas de emissões	Ferro	Areia	Brita	Rochas Ornamentais
– tCO₂eq	(sem pelotização)			
	1.438.890,73	648.992,19	501.568,49	114.671,78

Fonte: Adaptado do IBRAM (2014).

Estima-se que 60% da produção nacional de areia é destinada para a produção de vidro (LUZ; LINS, 2005). Levando em consideração as estimativas de emissões de CO₂ da areia e de rochas ornamentais, bem como o percentual de resíduos gerados no beneficiamento de rochas

³ Para a elaboração do relatório do IBRAM (2014), para cada bem mineral, as empresas foram escolhidas em ordem decrescente de movimentação de minério, e cujo somatório representava, no mínimo, 80% do valor total de minério movimentado (t ROM). A partir desses valores foram estimadas as projeções para 100% do valor de ROM em cada bem mineral.

ornamentais, reforça o benefício do uso da LBRO como material substituto da areia na produção de vidros.

2.2 LEGISLAÇÃO E USO DE RESÍDUOS

Atualmente, existem diversas resoluções e leis que definem e orientam quanto aos resíduos. No Brasil, existe a legislação vigente através da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio de Lei nº 12.305/2010 e, também pela Resolução CONAMA nº 307/2002.

A legislação dispõe de formas a equilibrar os aspectos ambientais (ações de diversas naturezas do homem para com o meio ambiente), definindo estratégias a fim de orientar na gestão dos resíduos sólidos, evitando os impactos ambientais (BRASIL, 2010a).

Não é novidade que, para aumentar as chances de obter sucesso, esse tipo de administração requer a participação do setor público e da sociedade. O parágrafo único do artigo 30 da seção II, menciona uma responsabilidade compartilhada, visto que, todo produto possui um ciclo de vida, portanto, perpassa por diversas fases, onde sofre ações de diferentes atores (BRASIL, 2010b).

A Lei nº 12.305/2010, além de visar a redução na geração de resíduos, traz a questão da logística reversa em seu artigo 3, que, conforme inciso XII, informa a logística reversa como um:

[...] instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada; (BRASIL, 2010a).

Partindo desse pressuposto, a Resolução CONAMA nº 307/2002, informa que o setor da construção civil é o principal gerador de resíduos com potencial técnico e econômico para materiais reciclados, estabelecendo assim, quando possível, o tratamento dos resíduos e o seu reuso (CONAMA, 2002). Já a Resolução CONAMA nº 448/2012, orienta como boa prática, a correta segregação e classificação de materiais com potencial de reuso (CONAMA, 2012).

De acordo com a ONU(2021), são gerados cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano. No Brasil existem diversas normas aplicáveis a resíduos sólidos, auxiliando no embasamento para identificar, caracterizar, classificar, dando diretrizes em relação à área transbordo e triagem, requisitos básicos para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos de classe A, além de estabelecer uso dos RCD, como é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Normas Técnicas Brasileiras de Referência (NBR) Aplicáveis aos Resíduos

NBR	Descrição
NBR 10.004/2004	Resíduos sólidos – Classificação
NBR 15.112/2004	Resíduos de construção e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15.113/2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15.114/2004	Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação
NBR 15.115/2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos

Fonte: Adaptado da ABNT (2004a, 2004b, 2004c, 2004d, 2004e).

Karaca, Pekin e Deliormanli (2012) verificaram em 50 empresas de indústria de pedras os processos operacionais como: a extração, cortes, serragens, polimentos, a planta industrial e os resíduos gerados. Quanto aos resíduos, Karaca, Pekin e Deliormanli (2012), sugeriram conforme Quadro 2 possíveis destinações de uso.

Quadro 2 – Possíveis Destinações e Uso de Resíduos de Indústrias de Pedras

Grupo	Processos	Resíduos	Destinação para Uso
Sólido	Pedreira	Pedras rejeitadas, arroz, fragmentos de fio de diamante, produtos químicos e óleo	Pedra (vaso e bijuteria)
	Planta industrial	Resíduos abrasivos, resíduos de serra e de fresa e óleo	Construção (agregado, material de preenchimento, armadura e gabião)
Partículas de pedra (secar e voar)		Química (destinação, clareamento e abrasivo) Agricultura e pecuária (regulador de ácido, fertilizante e criação de animais)	
Partículas de pedra, serragem, resina, metal, produtos químicos e óleo		Pedra (preenchimento de poros), construção (filler), química (cerâmica e plástico)	
Lama, Semi-lama e Pasta	Lavra ao beneficiamento	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais	Vidro Sodo-cálcico, borossilicato

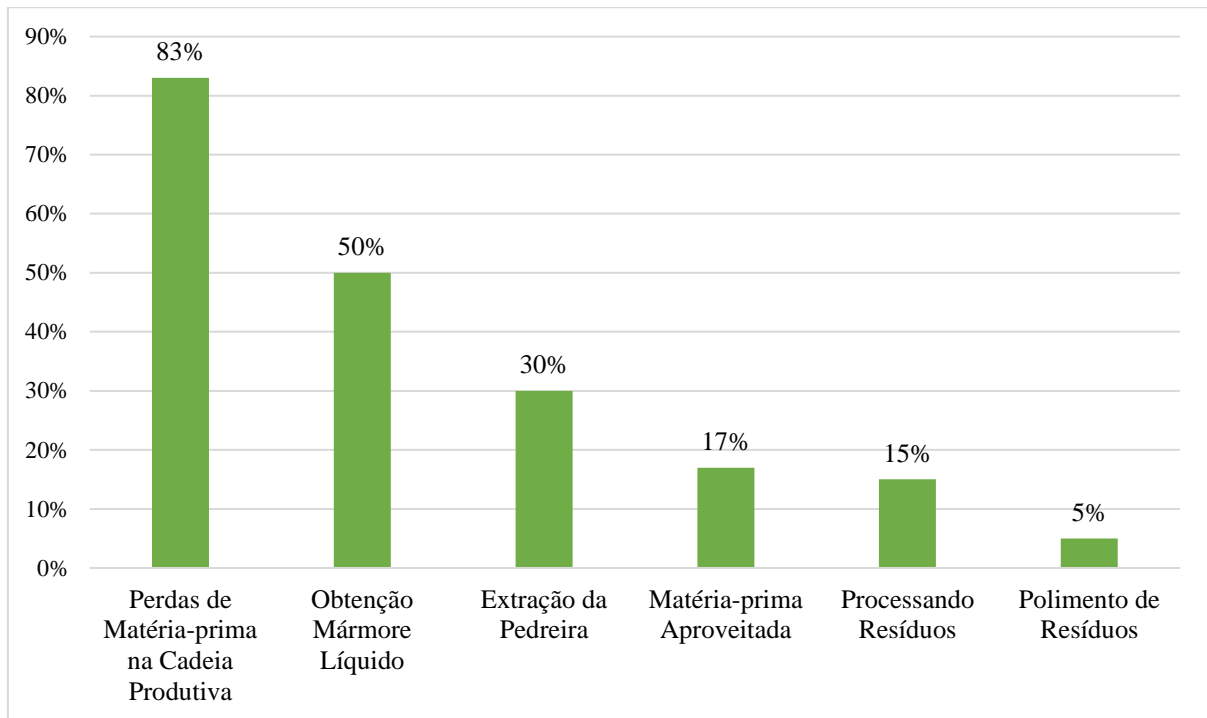
Fonte: Adaptado de BABISK (2009); MARÇAL (2011); KARACA; PEKIN; DELIORMANLI (2012); BASTOS (2018); SANTOS (2021).

Maroto e outros (2019), realizaram diversos testes em diversos rejeitos da mineração, como o uso de magnesita, termoplástico, fibra de carbono e outros resíduos de mineração, assim intitulado por eles. Esses foram utilizados no processo de fabricação de concreto magro de baixas resistências mecânicas. Após os resultados da Fluorescência de Raios X (esse proporciona o quantitativo e o espectro de materiais e do DRX (evidencia o resultado da interação e mudanças de fase) dos rejeitos, constatou-se grande quantidade de material vitrificante. Portanto, com potencial e características para fabricação de vidro.

Para a produção de 330m² de chapas, são necessários a extração de 30m³ de rocha maciça, sendo que, para a produção dessa quantidade de chapas, precisa-se de em média de um bloco de 10m³ (CAMPOS, 2014). Somando a matéria-prima que é desperdiçada, rejeitos e resíduos gerados

na cadeia produtiva (lavra e beneficiamento) de rochas ornamentais, cerca de 83% de todo o material é perdido ao longo dos processos. No Gráfico 2, mostra-se em percentual, a quantidade de resíduos gerados para cada processo em uma indústria de mármore e o percentual de perdas comentada por Campos (2014).

Gráfico 2 – Resíduos Gerados por Processos em uma Indústria de Mármore e o Montante de Perdas da Matérias-primas na Cadeia Produtiva de Rochas Ornamentais



Fonte: Adaptado de CAMPOS et al., (2014); SINGH et al. (2017).

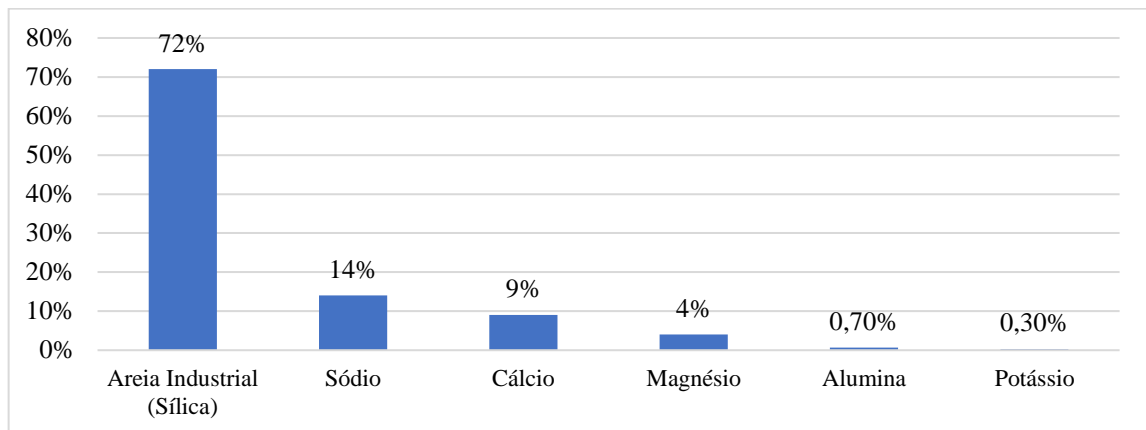
Zichella e outros (2018) verificaram que, o lodo de corte de rochas silicáticas poderia ser aproveitado em alguns produtos como concreto e o próprio vidro. Reforçando um dos princípios da PNRS que é a valorização dos resíduos, que através da correta segregação, tratamento, armazenamento e posteriormente o seu reaproveitamento, é possível criar possibilidades de emprego e renda, além de promover o impacto evitado, caso o resíduo fosse aterrado ou incinerado.

2.3 VIDRO

2.3.1 Características gerais e composição

O vidro sodo-cálcico possui em sua composição a areia industrial (sílica), potássio, alumina, barrilha, magnésio, sódio e cálcio com suas respectivas proporções, conforme estabelecido no Gráfico 3. Já no Quadro 3, é possível verificar a função de algumas matérias-primas para fabricação do vidro.

Gráfico 3 – Composição do Vidro Sodo-cálcico



Fonte: Adaptado de CEBRACE (2020).

Quadro 3 – Matéria-prima e suas Funções na Vitrificação

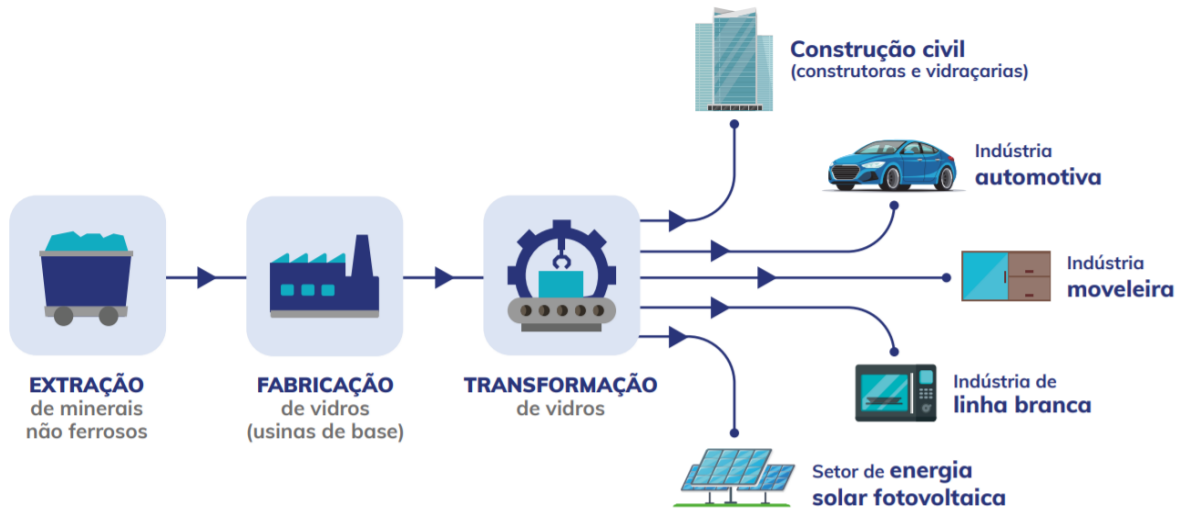
Material	Função
Areia Industrial (Sílica)	Vitrificante
Alumina	Resistência mecânica
Magnésio	Resistência às mudanças bruscas de temperatura
Cálcio	Estabilidade contra os ataques químicos
Sódio	Fundentes

Fonte: Adaptado de CEBRACE (2020).

2.3.2 Cadeia Produtiva

A cadeia produtiva do vidro, onde é representada pela Figura 3, inicia com a extração de minerais não ferrosos, que fornece a matéria-prima para a indústria de base, que por sua vez produz o vidro plano ou sodo-cálcico, também conhecido como vidro *float*, servindo como insumo para a indústria processadora. Na indústria de processamento, o vidro *float* sofre transformações para ganhar características conforme o uso final na construção civil (FREIRE, 2016).

Figura 3 – Cadeia Produtiva do Vidro



Fonte: ABRAVIDRO (2021).

Cada etapa dessa cadeia produtiva, possui seu ciclo de vida específico de produção, o do vidro, necessita de matéria-prima bruta para ser transformada ou o insumo, já disponível no mercado, transporte para a fábrica, produção do material, no caso, o vidro plano/*float* ou o vidro processado, utilização do produto, fim do uso, transporte dos resíduos, reciclagem e reuso ou eliminação dos resíduos (LIBRELOTTO; FERROLI, 2020).

No ciclo de vida da indústria de base do vidro, existem diversos processos em seu ciclo de vida, um deles é a de fusão dos materiais, neste caso, sendo responsável por mais de 85% das emissões para a produção do sodo-cálcico. Os impactos podem aumentar quando incluídos os processos responsáveis pelo formato, polimento, cor, finalidade e novas características, bem como a fonte de energia dos fornos industriais (CNI, 2016).

A CNI (2018), por meio do relatório de Mudanças de Clima e Indústria Brasileira, buscou instruir, recomendar e promover iniciativas no setor industrial como um todo, para que encontrem meios para reduzir os impactos ambientais que são gerados através dos ciclos de produção da indústria brasileira. Neste relatório, foi levantada uma nova perspectiva para a indústria, com práticas e incentivos que promovam um maior controle de ações no âmbito de governança, financiamento, competitividade, tecnologia e inovação, energia, florestas e adaptação de mudanças climáticas.

A indústria de vidros vem promovendo relatórios sobre a importância da redução das emissões de GEE, apresentando linhas de financiamento pela economia verde, para obter uma redução do consumo de energia, água e a troca do combustível fóssil pelo renovável. Além disso, o segmento entendeu que, a criação de inventários dos ciclos de produção é importante para que sejam identificados pontos críticos que possibilitem oportunidades para aplicações das medidas

de redução de GEE, de carbono e ações que melhorem a reputação da empresa no contexto da sustentabilidade (CNI, 2018).

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Novas legislações e boas práticas, quanto as questões ambientais, têm sido propostas no Brasil. Recentemente, foi criada a Lei 14.206/2020 sobre o marco legal do saneamento básico. Através do Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV)⁴ é apresentada a importância da criação de inventários de produtos, bem como, a avaliação dos impactos ambientais do seu ciclo de vida, pelo Sistema de Contas Econômicas Ambientais (SCEA)⁵, são discutidas sobre as padrões contábeis e estatísticos a fim de comparar com outros dados internacionais, a contabilização dos estoques, fluxos e as riquezas que os recursos naturais geram através do seu uso (GIZ, 2019), de forma, a possibilitar a medição de impactos no meio ambiente através de indicadores não convencionais como o PIB (BRANDT, 2012).

Portanto, há uma necessidade de que os sistemas produtivos tornem-se mais eficazes, que tenham menos desperdícios e apresentem produtos de melhor qualidade e sejam menos custosos a sua produção (SATOLO *et al.*, 2020). A ACV busca conduzir as empresas a identificarem os pontos que necessitam de melhoria, a simular alternativas de produção com intuito de evitar, por exemplo, o excesso de extração de matéria-prima.

Além da ACV, existem certificações que buscam priorizar também uma produção limpa, eficiente, preocupada em reduzir os impactos ambientais, projetar e desenvolver produtos mais sustentáveis, como os edifícios verdes. Algumas das certificações reconhecidas mundialmente são: *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) e *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) (WU *et al.*, 2020). Tais certificações, de modo geral, visam verificar áreas e inovações aplicadas a envoltória, materiais e processos construtivos, acondicionamento, tratamento e reuso de águas pluviais, cinzas e outras; eficiência energética, redução do consumo de recurso e de emissões de GEE. Além das certificações internacionais citadas, no Brasil também é possível encontrar certificações ou

⁴ Programa comentado no tópico 2.4.3.

⁵ Através do Sistema de Contas Econômicas Ambientais (SCEA), sistema esse que tem a ONU como “responsável pela estrutura estatística que fornece conceitos internacionalmente acordados, definições, classificações, regras de contabilidade e tabelas padrão para a produção de estatísticas comparáveis internacionalmente sobre o meio ambiente e sua relação com a economia” (BRANDT, 2012, p. 11).

instrumentos com procedimentos para a promoção da sustentabilidade urbana, como o SBTool, Qualiverde, (BH Sustentável e AQUA-HDE).

Tão logo, essas certificações e a metodologia ACV acabam tendo um mesmo objetivo geral, que é contribuir para uma melhor gestão ambiental possibilitando, por exemplo, medir o valor sustentável de um edifício, estimar os impactos ambientais em todo o seu ciclo de vida (VANZOLINI, 2020).

A NBR ISO 14040, foi criada inicialmente em 2004 (equivalente a ISO 14040/1997), onde recebeu atualizações em 2006, 2009 e foi corrigida em 2014 e, tem como finalidade trazer todos os conceitos iniciais de ACV e a sua estrutura. Já a NBR ISO 14044/2009 abrange mais os conceitos e requisitos da metodologia. No entanto, é possível verificar no Quadro 4 outras normas que auxiliam na melhor compreensão da aplicação desta metodologia, através de exemplos, ilustrações e informações extras quanto a ACV.

Quadro 4 – Normalização da Avaliação do Ciclo de Vida

Normas	Descrições
NBR ISO 14040/2009	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura
NBR ISO 14044/2009	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações
NBR ISO TR 14047/2016	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto
ISO TS 14048/2002	<i>Environmental management – Life cycle assessment - Data documentation format</i>
NBR ISO TR 14049/2014	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário
NBR ISO/TS 14027/2019	Rótulos e declarações ambientais – Desenvolvimento de regras de categoria de produto
NBR ISO/TS 14033/2016	Gestão ambiental – Informações ambientais quantitativas - Diretrizes e exemplos
NBR ISO/TS 14067/2015	Gases de efeito estufa – Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação
NBR ISO/TS 14071/2018	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009
NBR ISO/TS 14072/2019	Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional

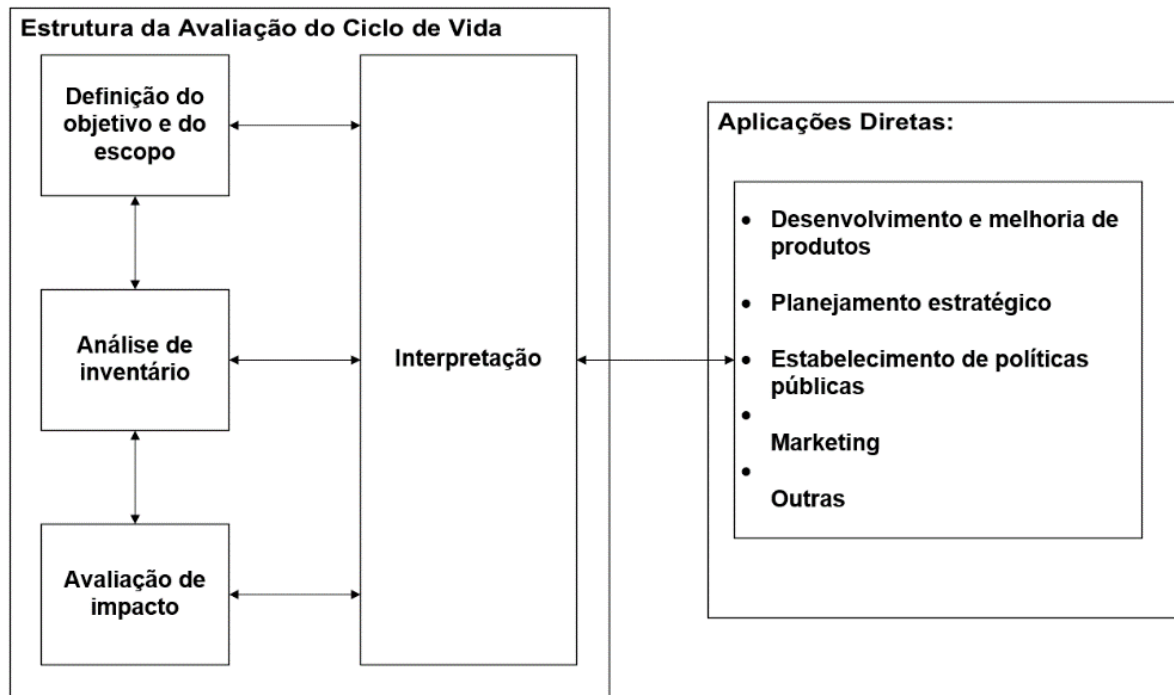
Fonte: Elaboração própria a partir da ISO(2002); ABNT(2009a, 2009b, 2014, 2015, 2016a, 2016b, 2018, 2019a, 2019b).

Ao realizar uma ACV de um produto, busca-se descobrir os processos e aspectos humanos, que geram maiores resíduos, emissões de gases tóxicos e demanda energética, e apresentada seus resultados de forma a possibilitar possíveis comparações. Dessa forma, auxiliando aos tomadores de decisão das empresas em posse dos resultados de uma ACV, tenham o conhecimento como um todo do ciclo de produção, identificando as particularidades de cada processo e seus respectivos impactos gerados.

2.4.1 Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida é estruturada conforme as NBRs ISO 14.040 e 14.044, onde possuem as seguintes fases: objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação de impactos e interpretação dos dados (ABNT, 2009a), como no Figura 4 é apresentado.

Figura 4 – Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Elaboração própria a partir da ABNT (2009a).

2.4.1.1 Definição de objetivo e escopo

Essa fase trata dos objetivos, razões e intenções para realização da ACV, qual o público alvo deseja atingir, o escopo do projeto, se é uma análise inicial e introdutória para novas pesquisas ou se servirá para comparação com outros produtos, grau de relevância e profundidade (ABNT, 2009a).

Em relação ao escopo da ACV, alguns itens são essenciais e necessários para melhor compreensão do estudo, do que pretende avaliar e quais os objetivos que o autor pretende atingir com esse estudo. No Quadro 5 é possível verificar os itens do escopo da ACV, bem como, alguns exemplos ou entendimento de cada um deles.

A ACV possui uma flexibilidade quanto a manipulação de dados, adoção do método de avaliação do impacto de forma que seja mais próxima da realidade e objetivos da empresa, seja de pequeno, médio ou grande porte, tornando assim os resultados mais precisos (ABNT, 2009a).

Quadro 5 – Escopo do Projeto da Avaliação do Ciclo de Vida

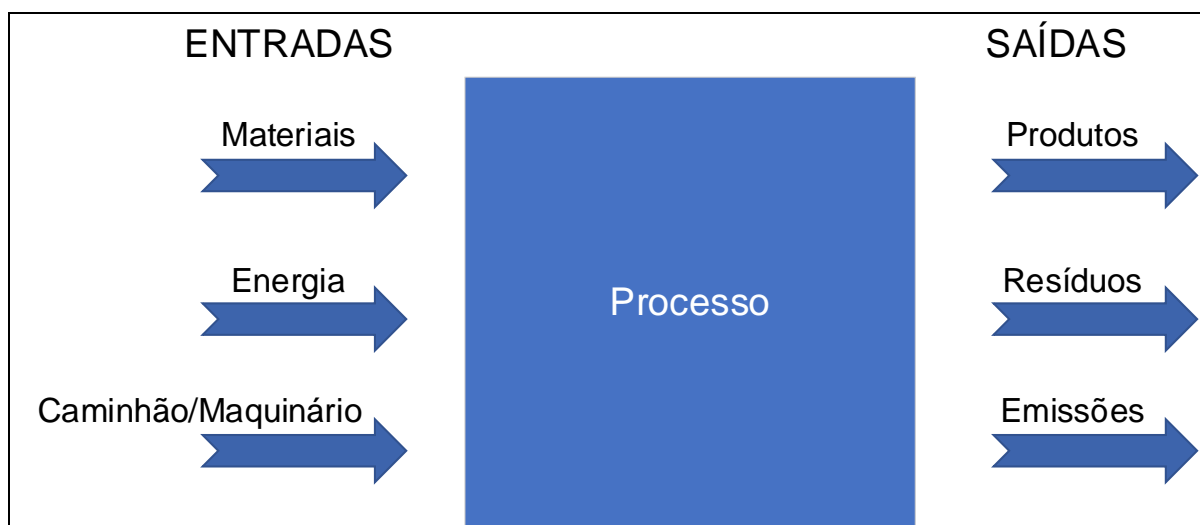
Item	Exemplos/Orientações
Sistema de produto a ser estudado	Vidro, Concreto, Gasolina e Desempenho de um automóvel
Funções do sistema de produto	Armazenar, acondicionar bebidas e sistema de vedação
Unidade funcional	m ³ , m ² , m, km/l, kg
Fronteira do sistema	<i>Cradle-to-gate</i> (da extração da matéria-prima ao portão da fábrica)
Procedimentos de alocação	Produto, resíduo, resíduo reciclado e coproduto.
Metodologia de Avaliação de Impacto	CML, Ecoindicador 99, Impact 2002+, Recipe, CED e IPCC 2013
Requisitos de dados	Matriz Pedigree
Pressupostos	Adotar uma matriz energética diferente do país em que será feito o estudo por falta de dados
Limitações	Coletar dados de um determinado processo do ciclo de vida
Valores opcionais	Média anual
Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados	Análise de Sensibilidade e Análise de Incertezas
Tipo de análise crítica, se aplicável	A ACV satisfaz os requisitos à metodologia, dados e interpretação
Tipo e formato do relatório requerido para o estudo	Apresentar todas as fases da ACV, bem como os resultados e interpretações conforme seu público alvo

Fonte: Adaptado da ABNT (2009a).

2.4.1.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O desenvolvimento da etapa de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) demanda mais tempo que as demais, visto que, dependendo dos casos, a metodologia para a coleta de dados de cada fluxo de energia (entrada e saída) de um determinado ciclo de vida, torna-se um trabalho de estudo e investigação primordial, visto que, os resultados gerados pelo método de Avaliação de Impacto são com base no inventário produzido (CHANG; HUANG; MASANET, 2014). A Figura 5, traz uma demonstração de fluxos de entrada e saída para um processo de ICV:

Figura 5 – Demonstrativo de Fluxos de Entrada e Saída para um Processo de ICV



Fonte: Elaboração própria a partir da ABNT (2009a).

Em relação aos fluxos, esses podem ser: Fluxo de Produto, Fluxo de Resíduo e Fluxo Elementar. Esse último é o responsável por gerar o impacto do processo. O fluxo é tudo o que entra e sai de cada processo, ou seja, matéria-prima que precisa ser extraída da natureza, materiais, maquinário, caminhões, energia, emissões ao meio ambiente, seja ar, água e solo. Portanto, um processo é o que transforma ou o que produz algo, um produto (ABNT, 2009a).

Islam e outros (2016) comentam que é possível encontrar trabalhos de ACV de mesmo ciclo de produção, mas com uma mudança na qualidade dos dados do inventário. Essa mudança não está associada apenas por objetivos e escopos diferentes, mas também pelo prazo para elaboração do ICV do projeto de ACV, recurso financeiro disponível e pela ausência da Análise de Sensibilidade de dados.

Existem diversos bancos de dados de inventários, por exemplo, o Ecoinvent, que contempla informações quantitativas relacionadas a cadeia produtiva de diversos produtos e segmentos como agricultura, materiais de construção, produtos químicos, eletricidade, peixes, metais, refinarias, têxteis, alojamento turístico e abastecimento de água. Proporcionando assim uma maior credibilidade no estudo devida à abrangência e relevância do banco de dados (WERNET et al., 2016). A versão 3.6 atualizou cerca de 2.500 conjuntos de dados e incluiu outros 2.200, além de ampliar a cobertura dos países e regiões de diversos continentes (IBICT, 2019a).

Definida a fronteira sistêmica de produção que a ACV pretende verificar, é necessário verificar no ciclo de vida, os processos principais e secundários para produzir determinado produto. O termo “*cradle to gate*” (do berço ao portão da fábrica), expressa os processos que partem da extração da matéria-prima até a fabricação do produto (ABNT, 2009a).

Existem outras variações, onde são inclusos mais processos nesse ciclo produtivo, ampliando a gama de informações a serem levantadas. Por exemplo: “*cradle to grave*” (do berço ao túmulo), contemplando o processo do fim da vida útil do material; a fronteira “*cradle to cradle*” (berço ao berço), quando incluem processos de logística reversa (ABNT, 2009a, 2009b).

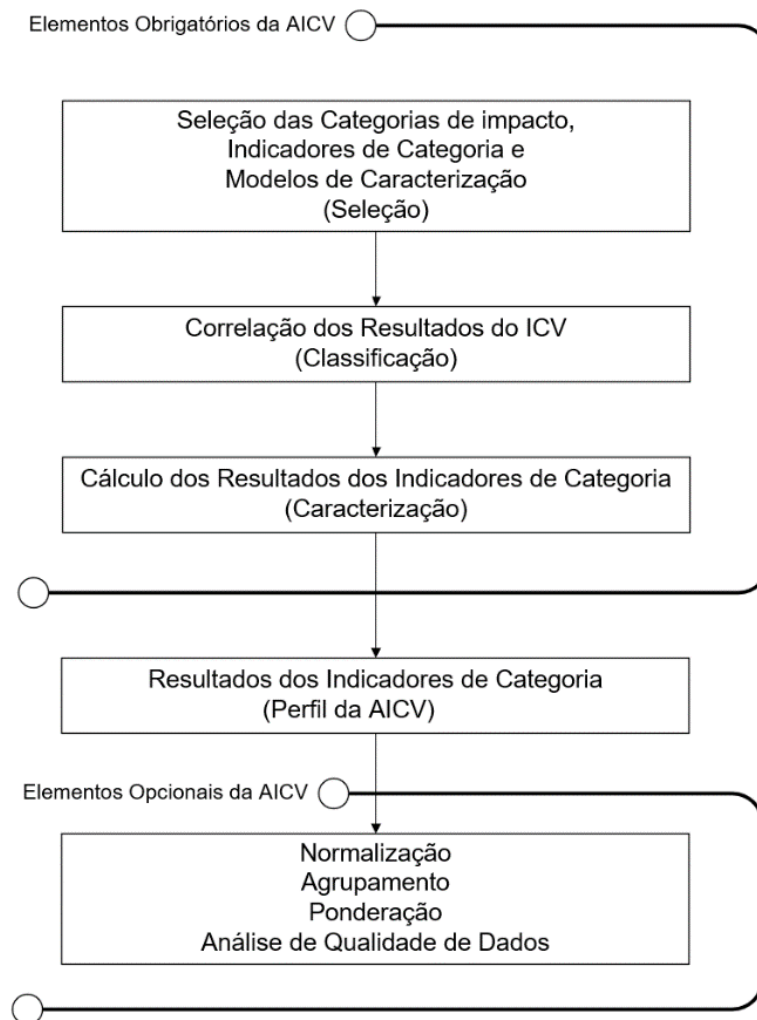
No Brasil, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), um órgão de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), vem sendo o responsável pela gestão e manutenção do Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida, por fomentar pesquisas e criar parcerias entre o setor industrial, o governo e as instituições de ensino (IBICT, 2019b).

2.4.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Esta fase traz as informações geradas com base nas análises de processos do inventário do ciclo de vida, a fim de melhor representar o perfil ambiental de um determinado produto, apresentando estimativas dos impactos ambientais dentro dos indicadores que o método Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (FERREIRA, 2004).

Todo AICV deve conter método avaliativo, que em maneira geral, possui uma estrutura que passa pela etapa de seleção, correlação com ICV e caracterização dos impactos ambientais (ABNT, 2009b), como é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Elementos de uma AICV



Fonte: Adaptado de ABNT (2009a).

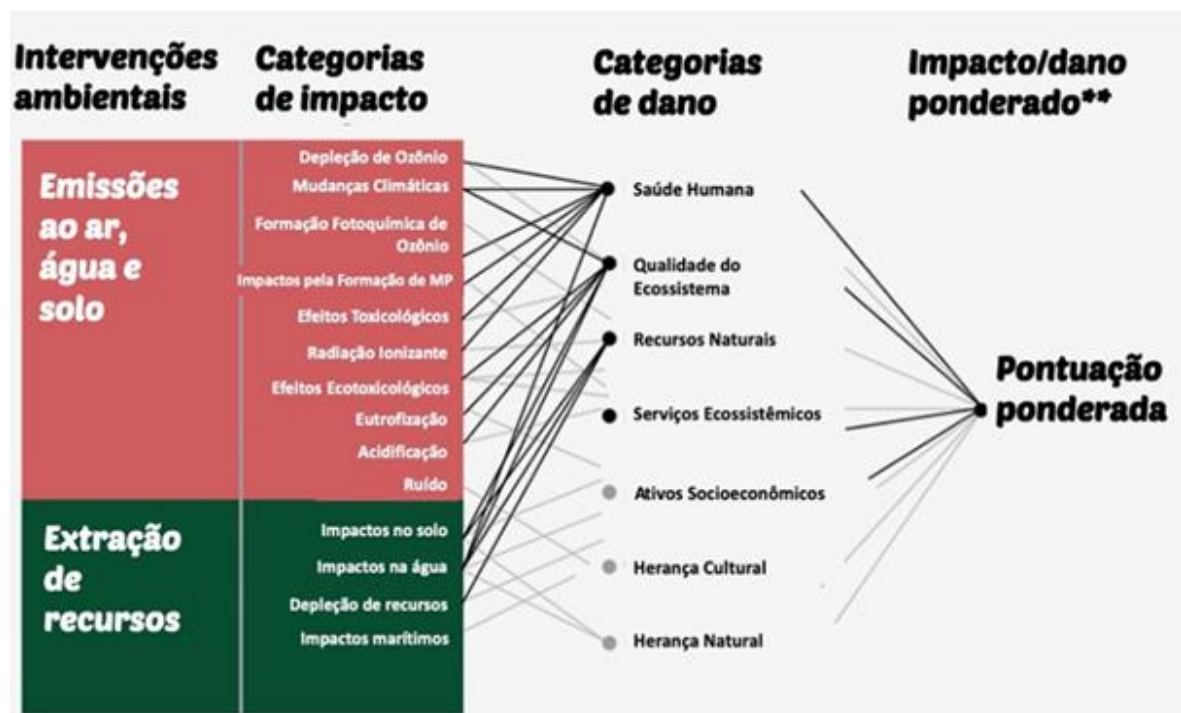
Dos métodos, existem níveis de abordagem de categoria única ou de múltiplas categorias, no caso das múltiplas, são denominadas as de pontos médios (*midpoint*) e as de pontos finais (*endpoint*) ou uma combinação dos dois (SOARES; TOFFOLETTO; DESCHÊNES, 2006; LASVAUX et al., 2016).

Casagrande (2018) ao citar Haes e outros (2002) e a NBR ISO 14040 (2009a) explica que:

[...] categorias de impacto em nível *midpoint* representam as questões ambientais relevantes e são todos os elementos de um mecanismo que se enquadram entre intervenções ambientais e pontos finais. Neste sentido, o ponto final (*endpoint*) é o atributo ou aspecto que identifica questões ambientais de danos físicos a elementos valiosos para a sociedade. As abordagens em nível médio (*midpoint*) são relativamente mais confiáveis, mas ao mesmo tempo, menos relevantes ambientalmente, enquanto que as de *endpoint* são bastante relevantes, mas com maior nível de incerteza (CASAGRANDE, 2018, p. 53).

Para melhor entendimento, na Figura 7, apresenta-se a estrutura de avaliação de impacto da AICV.

Figura 7 – Estrutura de Avaliação de Impacto da AICV



Fonte: UNEP (2021b).

A estrutura de uma AICV depende de um ICV, pois são levantados os processos daquele ciclo de vida que se pretende avaliar. Nos processos, como já comentado, podem existir fluxos de entrada e saída, estes, podem provocar intervenções ambientais do tipo extrações de recursos e/ou emissões. O método AICV correlaciona essas intervenções em categorias de impactos ambientais, também conhecido como os pontos médios (*midpoint*), através dos indicadores de impacto ambiental em potencial, como, mudanças climáticas, acidificação, impactos no solo e na água. Esses indicadores de impactos não representam o impacto ambiental final das intervenções ambientais listadas. Portanto, as categorias de impacto são correlacionadas em categorias de danos (*endpoint*), onde são listados os indicadores que permitem aos tomadores de decisão uma melhor percepção do impacto ambiental, como, saúde humana, qualidade do ecossistema e serviços ecossistêmicos. Por fim, por conta das subjetividades em relação as

unidades de cada categoria de impacto/dano ambiental, as formas de conversão e equivalências, os danos são convertidos em uma pontuação ponderada, o que permite realizar ACV comparativas (COELHO, 2016).

No Quadro 6, podem ser vistos alguns dos métodos de AICV mais utilizados, bem como seu nível de avaliação, abrangência de caracterização e o país ou comunidade de origem.

Quadro 6 – Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida x Abrangência de Caracterização

Método	Nível de Avaliação	Abrangência	Origem
CML 2002	<i>Multi-category</i>	<i>Midpoint</i>	Holanda
Eco-indicador 99		<i>Endpoint</i>	Holanda
<i>Ecological scarcity</i>		<i>Midpoint</i>	Suíça
		<i>Endpoint</i>	
EDIP 2003		<i>Midpoint</i>	Dinamarca
ReCipe		<i>Midpoint</i>	Holanda
		<i>Endpoint</i>	
TRACI		<i>Midpoint</i>	EUA
IPCC 2013		<i>Midpoint</i>	Comissão Europeia
Impact 2002+		<i>Midpoint</i>	Suíça
	<i>Endpoint</i>		
<i>Cumulative Energy Demand (CED)</i>	<i>Single-category</i>	-	Suécia

Fonte: Adaptado de MENDES (2013); VINHAL (2016); GIROTTO (2018).

O CML 2002 foi criado pela Universidade de Leiden na Holanda em 2001 e contém cerca de 1700 fluxos diferentes. O escopo do método, é aplicável a nível global abrangendo impactos de nível médio, como: Acidificação, Alterações Climáticas, Ecotoxicidade, Eutrofização, Toxicidade humana e Destruição da camada de ozônio. Já os impactos Acidificação e Oxidação fotoquímica são aplicáveis apenas em países europeus (ECOCOST, 2020; MENDES, 2013).

O Eco-indicador 99, é o método mais amplamente utilizado na ACV, destaca-se por ser o primeiro da abrangência de ponto final (saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos). É gerado no final da AICV uma pontuação ponderada (Pt) conforme o é mostrado na Figura 8 e a partir dessa pontuação é possível realizar comparações entre produtos (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Em relação ao método *Ecological Scarcity*, este realiza os cálculos de impactos ambientais relacionados ao esgotamento de recursos de fatores ecológicos, como: resíduos depositados, emissões no solo, ar, águas subterrâneas e superficiais, recursos naturais e de energia. Esses fatores normalmente estão vinculados a uma determinada legislação ou política pública ambiental, portanto quanto maior for o consumo desses recursos, maiores são as chances de determinado ciclo de produção analisado estar fora dos padrões aceitáveis por essa meta pública (FOEN, 2013).

O método *Environmental Development of Industrial Products* (EDIP) 2003, é uma versão atualizada da EDIP 1997, abordando os grupos de impactos semelhantes ao método CML 2002. Ou seja, esse método afere os impactos relacionados a depleção de recursos abióticos, no caso, recursos fósseis, metais e minerais (IBICT, 2019c).

O ReCipe é um método que abrange tanto os pontos médios, quanto os pontos finais, constituído pelos métodos Eco-indicador 99 e o CML 2002. Foi avaliado, assim como o método Impact 2002+, com a nota mais alta, sendo então um modelo recomendado para a realidade brasileira. O método permite analisar os impactos ambientais relacionados com a escassez de recursos (minerais e combustíveis fósseis), ecossistema e saúde humana (BUENO, 2014; ECOCOST, 2020).

O método TRACI é utilizado quando o objetivo é avaliar a eutrofização em água doce e marinhas (ECOCOST, 2020). Inicialmente, direcionado para o continente da América do Norte, principalmente os Estados Unidos da América. Foi desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) de acordo com a legislação e com metas de sustentabilidade para os Estados Unidos (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), é um órgão atrelado a ONU que tem por objetivo principal desenvolver estudos sobre as mudanças climáticas, tendo como embasamentos, informações analisadas através de três frentes de trabalho, uma direcionada à base científica para mudança climática, outra para os impactos, insegurança e adaptação provocadas pelas mudanças climáticas e a terceira voltada para desenvolver soluções para mudanças climáticas. Portanto, abrange análises e estudos no âmbito científico, técnico e socioeconômicos (IPCC, 2020).

O relatório especial sobre aquecimento global discorre de medidas para limitar o aumento de 1,5°C da temperatura mundial sugerindo, por exemplo, uma maior ingestão de vegetais nas dietas, reflorestamento, mudanças de práticas agrícolas, entre outros, mas o principal está na remoção do carbono. O relatório, propõe medidas aplicáveis para atingir tal meta, no entanto, dependem de políticas públicas para implantação e execução. Algumas das consequências positivas seriam a economia, ampliação do acesso à energia, transporte sustentável, qualidade dos alimentos, melhoria da saúde humana e recuperação da qualidade e capacidade de absorção de CO₂ pelo solo (IPCC, 2018).

Aliás, o Brasil adotou as “Diretrizes de 2006 do IPCC” sobre Mudança do Clima, para a elaboração do Relatório dos Resultados do Inventário Nacional de Emissões de GEE, essa

adoção está de acordo com a Decisão 17/CP.8 da Convenção Quadro das Nações Unidas (UNFCCC) da ONU, que é de preparar os países em desenvolvimento na elaboração de relatórios conforme o IPCC (MCTIC, 2021).

Duas categorias de impactos ambientais são essenciais quando utilizado o método IPCC, referem-se ao *Global Warming Potential* (GWP) e o *Global Temperature Change Potential* (GTP), responsáveis respectivamente pelo aquecimento e temperatura global (FRISCHKNECHT, 2017).

A Iniciativa do Ciclo de Vida da UNEP-SETAC recomenda o uso desses dois indicadores para a categoria de mudanças climáticas informadas no 5º relatório de avaliação do IPCC, são eles: potencial de aquecimento global de 100 anos (GWP 100) e potencial de mudança de temperatura global de 100 anos (GTP 100) (FRISCHKNECHT et al., 2017).

Alvim e Mafra (2018) destacaram o crescimento dos percentuais de GEE na atmosfera, principalmente dos seus principais gases: carbônico (CO₂) e metano (CH₄). Portanto, o uso do método AICV, IPCC 2013, em pesquisas de ACV, permitirão estimar os impactos ambientais GWP e GTP, a fim de amparar possíveis intervenções de ciclo de produção. Esses estudos corroboram com medidas discorridas nas Conferências das Partes (COP) e nos tratados internacionais para redução dos impactos por conta das emissões GEE.

Outro método bastante utilizado em ACV no setor industrial, é o *Cumulative Energy Demand* (CED), sendo sua abordagem exclusiva para quantificação de demanda de energia acumulada nos diversos processos produtivos que se pretende avaliar. O método CED compreende impactos na coleta e consumo de energia de fontes renováveis e não renováveis utilizadas nos processos do ciclo de vida (FRISCHKNECHT et al., 2015).

O Impact 2002+ foi atribuído em diversas ACV pelo mundo e no Brasil com ênfase no concreto. No estudo de Zulcão e outros (2020) adotou-se uma combinação dos métodos, Impact 2002+, ReCiPe 2008, EDIP 2003, CED e IPCC, onde a pesquisa resultou após a simulação ACV, uma redução de 7,7% a 9% dos impactos totais ou da pontuação ponderada (baseado na Figura 7) a cada 10% de cimento substituído por “pasta de mármore” para a produção do concreto.

Lorenção e Silva (2018), adotaram o método Impact 2002+ para avaliar a substituição parcial do cimento pelo resíduo de bloco cerâmico, constatando também que, os impactos ambientais de abrangência *midpoint* foram minimizados, tendo como destaque a redução nos indicadores quanto ao uso de recurso mineral extraído na natureza, energia não renovável e aquecimento global.

Giudice e outros (2017) realizaram uma ACV Atribucional⁶ comparando placas cerâmicas ornamentais e Hossain e outros (2016) orientaram como obter melhor aproveitamento nos processos de reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (RCD) como, por exemplo, o vidro em Hong Kong.

Assim como foi apresentada na Figura 8 as categorias de impactos, no Quadro 7, podem ser visualizadas as categorias *midpoint*, *endpoint* e suas unidades, bem como a normalização dos seus resultados.

A normalização é um elemento opcional da AICV, de acordo com Fiori, Cybis e Fernandes (2014), são gerados os resultados normalizados:

de modo a perceber a magnitude do impacto na globalidade do problema ambiental. Assim, o fator de dano é normalizado dividindo-se o impacto por unidade de emissão pelo impacto total de todas as substâncias da categoria específica para a qual existem fatores de caracterização, por pessoa por ano. Esta informação é agrupada para a formação de um escore final que será o valor do indicador em pontuação única (Fator de Ponderação) em uma unidade chamada Ecopontos (Pt) ou quando o resultado em Pt é multiplicado por 1000 (mPt). A magnitude deste valor numérico expressa a magnitude do impacto ambiental global. Quanto maior for o valor do indicador, maior será o impacto ambiental do produto, atividade ou exploração.

Quadro 7 – Características do Método AICV Impact 2002+

(continua)

Categoria de Impacto (<i>Midpoint</i>)	Unidade de Referência (<i>Midpoint</i>)	Categoria de Dano (<i>Endpoint</i>)	Unidade de Referência (<i>Endpoint</i>)	Unidades da Categoria de Dano Normalizados
Toxicidade humana (cancerígenos + não cancerígenos)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	Saúde humana	DALY	Pontos (Pt)
Efeitos respiratório (inorgânicos)	kg C ₂ H ₄ eq		DALY	Pontos (Pt)
Radiação ionizante	Bq C-14 eq		DALY	Pontos (Pt)
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq		DALY	Pontos (Pt)
Oxidação fotoquímica (efeitos respiratórios orgânicos)	kg C ₂ H ₄ eq	Qualidade do Ecossistema	DALY	Pontos (Pt)
Ecotoxicidade aquática	kg TEG <i>water</i> eq		Não aplicado	Não aplicado
Ecotoxicidade terrestre	kg TEG <i>soil</i> eq		PDF.m ² .yr	Pontos (Pt)
Ocupação de solo	m ² <i>organic arable</i> eq		PDF.m ² .yr	Pontos (Pt)
Acidificação aquática	kg SO ₂ eq		PDF.m ² .yr	Pontos (Pt)
Eutrofização aquática	kg PO ₄ eq		PDF.m ² .yr	Pontos (Pt)

⁶Abordagem Atribucional é utilizada quando o objetivo da ACV é comparar empresas ou produtos de acordo com ciclo produtivo. Diferente da abordagem Consequencial que é indicada para tomada de decisão envolvendo demanda do produto, inclusão, exclusão ou substituições de atividades, utilizando dados de fornecedores (BRANDER; BURRITT; CHRIST, 2019)

Quadro 7 – Características do Método AICV Impact 2002+

(conclusão)

Categoria de Impacto (Midpoint)	Unidade de Referência (Midpoint)	Categoria de Dano (Endpoint)	Unidade de Referência (Endpoint)	Unidades da Categoria de Dano Normalizados
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	Pontos (Pt)
Uso de energia não renovável	MJ ou kg <i>Crude oil</i> eq (860 g/m ³)	Recursos	MJ	Pontos (Pt)
Extração mineral	MJ ou kg <i>Iron</i> -eq (em minério)		MJ	Pontos (Pt)

Fonte: Elaborado a partir JOLLIET et al. (2003).

São apresentadas no Anexo A, as definições dessas categorias, bem como as unidades dos métodos aplicados nesta dissertação (JOLLIET et al., 2003; ANICER, 2011; FIORI, CYBIS; FERNANDES, 2014; IBERDROLA, 2021).

2.4.1.4 Interpretação de resultados

Na etapa de Interpretação de Resultados da ACV, são apresentados além dos resultados, as informações de incertezas e sensibilidades dos dados do ICV, bem como, dos métodos de AICV utilizados, subsidiando o leitor e/ou tomador de decisão, interpretar as estimativas de impacto e determinar a melhor ação quando forem aplicar na prática (GIESEN et al., 2020).

De acordo com a ABNT (2009a), é apropriado que a interpretação dos resultados da AICV mostrem uma realidade alternativa, uma estimativa dos potenciais efeitos dos impactos ambientais. Para que seja realizada a ACV, é necessário, além de um *software* para a realização do cálculo, um banco de dados para auxiliar na elaboração do inventário.

2.4.2 Softwares de ACV

Os *softwares* contribuíram promovendo uma maior facilidade para a realização de cálculos, na busca por dados, que até então eram escassas ou de difícil compilação. Atualmente, tornou-se possível obter manuais quanto ao uso (BRONDANI, 2014), com simulações e exemplos nos *softwares*, como OpenLCA e Simapro (GOEDKOOOP et al., 2016; GREEN DELTA, 2020).

O que determina a escolha de um programa ou outro, é a disponibilidade para determinado país, aquisição pela universidade, disponibilidade de manuais, estudos de casos disponíveis, acessibilidade com banco de dados e experiências, possibilidade de treinamento, operabilidade, configuração mínima necessária para instalação e interfaces intuitivas, amigáveis (NETTO; LUCENTE, 2016).

Conforme pesquisa em periódicos que publicam sobre ACV, no Quadro 8, são apresentados com mais detalhes os prós e contras dos quatro *softwares* mais utilizados para aplicação da ACV, trata-se, do Simapro, do GaBi, do Umberto e do OpenLCA (SILVA et al., 2019a).

Quadro 8 – *Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos (Prós x Contra)*

<i>Software</i>	Prós	Contras
GaBi (Alemanha)	Possui três bancos de dados próprios além de aceitar a importação de outros bancos de dados; Utiliza-se de fluxograma para representar um ciclo de vida de um determinado produto; Precisão nos pontos de eficiência ou geração de impactos, facilitando a comunicação entre os atores do processo.	Falta de informação quanto a origem dos dados do banco criado; Não permite edição ou adaptação dos fluxos de energia e matéria; Necessita de treinamento por conta de algumas ações como alocações de produtos.
Umberto (Alemanha)	Telas intuitivas e de fácil usabilidade; Realiza avaliação de custo de ciclo de vida; Possibilita criação de fluxogramas de processos, matérias e energia; Possui diversos estudos de casos de sucesso, em indústrias e universidade.	Difícil obtenção de informações detalhadas de cada processo; Não permite edição ou adaptação detalhada de processos.
OpenLCA (Alemanha)	<i>Software open source</i> (gratuita); Praticidade para inserir e editar dados; Adaptabilidade entre bancos de dados e métodos de avaliação de impacto; Possibilidade de avaliar custo de ciclo de vida e social; Possui boa relação interface homem máquina.	Não possui base de dados própria, logo, necessita de aquisição de banco de dados.
SimaPro (Holanda)	Permite abordagem de Análise de Ciclo de Vida Consequencial; Facilidade no uso (incluir e editar) processos; Adaptabilidade de métodos AICV; Identificação precisa dos impactos ambientais; Mais utilizado para a ACV em indústrias e universidades.	Demanda uma infraestrutura para grande armazenamento de dados; Interface homem-máquina deficiente; Necessita de um fluxograma do processo produtivo para utilização paralela ao sistema; Depende da versão multiusuários para troca de informações em diversos computadores.

Fonte: Adaptado de CAMPOLINA (2015); ENCICLO (2015); NETTO; LUCENTE (2016); LORENÇÃO; SILVA (2018).

Além do software, é necessário a aquisição de banco de dados, por exemplo, o Ecoinvent. No Quadro 9, são apresentadas algumas características desse banco.

Quadro 9 – *Características do Banco de Dados Ecoinvent*

(continua)

Características do Ecoinvent	
I	Abrangência de dados
II	Aplicação sólida das fronteiras e alocação dos fatores de produção
III	Dispõe de documentação, glossários, relatórios históricos e uma seção com “Perguntas Frequentes” que podem ser acessados pela página de internet do Ecoinvent
IV	Seus dados são consistentes através do uso da distribuição log normal com desvio padrão (conformidade de dados de incerteza)
V	As emissões são especificadas de acordo com a densidade populacional (alta ou baixa) ou estratosfera

Quadro 9 – Características do Banco de Dados Ecoinvent

(conclusão)

Características do Ecoinvent	
VI	Possui informações de bens de capital essenciais para os sistemas de energia como eólica e hidrelétrica, mas também para sistemas de transporte
VII	Possui um editor de dados (EcoSpold 2), onde o usuário pode realizar novos inserções e edições, por meio de planilhas eletrônicas
VIII	É atualizado regularmente, proporcionando um inventário cada vez mais completo

Fonte: Adaptado de FRISCHKNECHT et al. (2005); GOEDKOOOP et al. (2013).

2.4.3 ACV no Brasil

A ACV no Brasil iniciou-se no ano de 1994 por causa de um comitê do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA), onde desenvolviam estudos quanto as normativas da família ISO 14000, referente a gestão ambiental. Em 1998, um primeiro livro na versão português foi publicado em que se explicava a metodologia da ACV como uma ferramenta de gestão ambiental (CHEHEBE, 1997; SATOSHI *et al.*, 2006).

Através da Resolução CONMETRO nº 4/2010, por meio do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO), o PBACV adotou com relevância o termo ACV ao incluir como objetivo:

(a) implantar no País um sistema reconhecido em âmbito internacional, capaz de organizar, armazenar e disseminar informações padronizadas sobre inventários do Ciclo de Vida da produção industrial brasileira; (b) disponibilizar e disseminar a metodologia de elaboração de inventários brasileiros; (c) elaborar os inventários base da indústria brasileira; (d) apoiar o desenvolvimento de massa crítica em ACV; (e) disseminar e apoiar mecanismos de disseminação de informações sobre o pensamento do ciclo de vida; (f) intervir e influenciar nos trabalhos de normalização internacional e nacional afetos ao tema; (g) identificar as principais categorias de impactos ambientais para o Brasil (CONMETRO, 2010, p. 4).

Na Resolução CONMETRO nº 1/2017, onde dispõe sobre "Diretrizes Estratégicas para a Metrologia Brasileira 2018-2022", o termo ACV foi mencionado no item de metrologia para o meio ambiente como um:

[...] instrumento de gestão ambiental que permite às organizações entenderem as incidências ambientais dos materiais, dos processos e dos produtos, podendo a informação obtida permitir a inovação, o desenvolvimento de novos produtos e detecção de melhorias a serem aplicadas, além de formular estratégias comerciais específicas (CONMETRO, 2017, p. 59).

No Brasil, como já foi dito, não existe metodologia de cálculo de impacto ambiental específico. Portanto, são identificados dentre os métodos AICV existentes, os mais adequados conforme o escopo e objetivo que se pretende em cada ACV e, por fim, são realizados os ajustes conforme cenário de estudo (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

No Quadro 10, são apresentados um breve histórico do aparecimento da ACV no Brasil.

Quadro 10 – Alguns Momentos da ACV no Brasil

Ano	Destaque da ACV em cada Ano
1999	Primeira pesquisa sobre ACV voltada para fabricação de embalagens
2001	Lançamento da NBR ISO 14040
	Participação brasileira em comitê exclusivo sobre ACV
2002	Responsável por disseminar a metodologia em instituições educacionais, indústrias, promovendo capacitação e congressos
2003	Incorpora a ACV em suas discussões e desenvolvimento de bases de informações e criação de banco de dados voltada a construção e assim elaborar um ICV
2004	Adota a ACV como método confiável para identificar o desempenho ambiental dos processos de produção de produtos
2005	Tratam da importância do entendimento e compreensão de todos os autores (governo, indústria e instituição de ensino) para garantir um melhor resultado final
2006	Criação de um banco nacional de inventário do ciclo de vida – SICV
2010	Através da Resolução CONMETRO nº 4/2010 verificam a necessidade de implantar um sistema padronizado para desenvolvimento do ICV da produção industrial brasileira
	Através da Política Nacional de Resíduos Sólidos, a ACV é mencionada com intuito de estimular o uso e aplicação
2017	Pela Resolução CONMETRO nº 1/2017 sobre Diretrizes Estratégicas para a Metrologia Brasileira 2018-2022, a ACV é mencionada como instrumento de gestão ambiental
2019	Criação de um relatório com recomendação de modelos de AICV para o contexto brasileiro

Fonte: Adaptado de IBICT (2020).

2.4.4 Ferramentas, limitações e riscos da metodologia ACV

2.4.4.1 Ferramentas da ACV

O Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) é um conceito que busca trazer uma compreensão e conscientização do ciclo de vida de sistemas de produção, a fim de identificar as interações (processos, fluxos e pontos críticos) com o meio ambiente e suas consequências ambientais, bem como, possibilitar possíveis ações mitigadoras (IBICT, 2021).

O conceito de Análise de Pontos Críticos (APC), tem como objetivo identificar áreas (país, cidade, setor produtivo, organização, portfólio de produto, categoria de produto, produto ou serviço individual), que necessitam ser prioridades em suas ações mitigadoras. A APC adota diversas fontes de informações como estudos de ACV, do mercado e de pesquisas científicas. Seus resultados são apresentados em um formato mais acessível e para um público menos técnico, quanto a metodologia, mas que toma decisões no contexto político e empresarial (UNEP, 2021b).

Dependendo do objetivo/escopo, tempo e recursos disponíveis, é possível identificar qual Ferramenta ACV⁷ trará a resposta almejada (JØRGENSEN; HERRMANN; BJØRN, 2013). Para tal, na Figura 8 podem ser observadas as principais ferramentas do Ciclo de Vida.

Figura 8 – Principais Ferramentas do Ciclo de Vida



Fonte: UNEP (2021b).

A Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida (A-ACV) é a ferramenta mais conhecida da ACV, seu objetivo é avaliar o uso de recursos, cargas ambientais e impactos na saúde que estão associados ao ICV (processos e seus fluxos de entrada e saída) ao longo do ciclo de vida de produtos, processos e atividades (UNEP, 2021b).

A Avaliação Organizacional do Ciclo de Vida (ACV-O), usa da perspectiva da A-ACV para compilar os impactos ambientais potenciais das atividades associadas a organização e a provisão de seus produtos, rastrear a performance ambiental durante um certo período, apoiar decisões estratégicas e fornecer dados para os relatórios da sustentabilidade da organização. Nesta ferramenta, não é incluída e indicada em seu objetivo, comparações entre diferentes organizações (UNEP, 2021b).

⁷ A Ferramenta ACV trata-se de opções ferramental dentro da ACV para alcançar seus objetivos. Não é um software. A ideia está mais voltada para uma metodologia.

Para avaliação social, adota-se a ferramenta Avaliação Social do Ciclo de Vida (ACV-Social), assim, possibilitando avaliar todos os aspectos sociais e sociológicos dos produtos (direitos humanos, condições de trabalho, herança cultural, pobreza, doença, conflito político, entre outros) e seus impactos, tanto positivos, quanto negativos em relação ao seu ciclo de vida. No entanto, para esta ferramenta, é necessário promover discussões na tentativa de levantar os indicadores e subindicadores de impactos sociais mais ajustados para determinado tipo de ciclo de produção ou para o país que está sendo aplicada a ACV, evitando assim, a subjetividade particular do pesquisador (HOSSEINIJOU; MANSOUR; SHIRAZI, 2014; UNEP, 2021b).

A ferramenta da ACV-Social, mesmo tendo uma menor representatividade (DONG; NG, 2015) quando comparadas com as demais Ferramentas da ACV, no entanto, possibilitam análises que podem remeter a uma reflexão de importância igual aos de impactos ambientais e de custos.

De acordo com a iniciativa da *Life Cycle Initiative*, entidade vinculada ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e que foi utilizada neste tópico para a revisão bibliográfica das Ferramentas da ACV, o Custeio do Ciclo de Vida (CCV), visa avaliar todos os custos (transporte, combustível, energia, água, embalagem, operação, manutenção, disposição final e/ou tratamento de resíduos, entre outros) associados ao ciclo de vida de um produto que são cobertos diretamente por um ou mais atores do ciclo de vida, com inclusão de externalidades previstas para serem internalizadas na análise, não estabelecendo a apenas a forma habitual do pensamento tradicional dos negócios, voltados para o custo do insumo, custo da produção, preço de venda e o lucro financeiro (SEBRAE, 2017; UNEP, 2021b).

No Quadro 11 são apresentados alguns indicadores da ferramenta de CCV.

Quadro 11 – Indicadores Econômicos

Indicadores de Impactos Econômicos
Custos com fornecedores ou com produção própria
Retorno financeiro pós cálculo dos custos produtivos
Possíveis indenizações
Custos com transporte
Possíveis prejuízo por perdas ou desperdícios
Custo com a energia e água
Custos com o combustível
Custos com instalação e manutenção
Custos com o tratamento ou disposição final de resíduos
Custos com embalagem
Custos com aquisição de matéria-prima

Fonte: Adaptado de SEBRAE (2017).

Já no Quadro 12, são apresentados alguns indicadores da ferramenta de ACV-Social.

Quadro 12 – Indicadores Sociais

Indicadores de Impactos Sociais
Apoio ao desenvolvimento de fornecedores
Política de comunicação comercial
Emprego seguro e justo
Sem sindicato
Gerenciamento do impacto da empresa na comunidade de entorno
Número suficiente de funcionários com deficiência
Práticas de anticorrupção e propina
Média salarial dos funcionários
Preocupação com saúde, segurança e condições de trabalho
Valorização da diversidade
Trabalho infantil na cadeia produtiva
Horas extras acima do limite legal
Exposição ao agrotóxico
Possíveis produtos transgênicos
Exposição ao calor
Riscos de acidentes

Fonte: Adaptado de DREYER; HAUSCHILD; SCHIERBECK (2006); SEBRAE (2017); WANG; HSU; HU (2017); SUREAU; NEUGEBAUER; ACHTEN (2020).

Já na Figura 9 é apresentada a concepção da ferramenta de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV). A ASCV incorpora as demais Ferramentas da ACV e os conceitos de PCV e o de Gestão do Ciclo de Vida (GCV). Este último, adotando as práticas empresariais de gestão, na integração do PCV.

Figura 9 – Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV)



Fonte: UNEP (2021b).

As Ferramentas de ACV não fornecem respostas para saber se o produto deve ser fabricado ou não, embora as informações obtidas nessa avaliação, traga elementos para pensar e podem ser úteis para uma tomada de decisão (XING; WANG; QIAN, 2013).

2.4.4.2 Análise de Sensibilidade

A Análise de Sensibilidade é uma técnica que permite entender quanto que as variações dos dados influenciam na quantificação do impacto ambiental (ABNT, 2009a). Essa análise está diretamente relacionada às incertezas de aferições de entrada e saída de cada processo (BARBOSA, 2012). Para o ILCD (2014), através da Análise de Sensibilidade é possível verificar se seu ICV requer modificação de fronteira e melhoria na qualidade de dados.

De acordo com a ABNT (2009b), os procedimentos para verificação de sensibilidade consistem em comparar os resultados obtidos inicialmente na pesquisa com resultados que sofreram a inserção de parâmetros, por exemplo, o parâmetro de transporte. Ao inserir o parâmetro com as variações de distância do transporte de insumos do produto, condiciona a reexecução da ACV e avaliar o quanto a variação em km pode agravar ou reduzir os impactos ambientais do ciclo de vida analisado.

Na pesquisa de García e outros (2007) sobre o processamento de rochas ornamentais (da mineração ao produto acabado), o centro de produção analisado ainda não tinha implantado o filtro prensa, portanto, não conseguiria medir o consumo de energia elétrica do maquinário. Contudo, para a Análise de Sensibilidade foram adotados dois valores (superdimensionado e subdimensionado) para parâmetro de energia, ou seja, $\pm 30\%$. Buscando dessa maneira, apresentar resultados da ACV que contemplassem a estimativa para o cenário proposto.

Medeiros (2019) explica, que nos resultados da ACV, o pesquisador pode adotar apenas categorias de impactos ambientais de maior influência e destaque e, a partir daí, explaná-las. No entanto, é possível como Análise de Sensibilidade aplicar outros métodos de AICV na intenção de observar se mudando o método os mesmos indicadores de impactos são tidos como mais relevantes.

Miller (2015) adotou, em sua pesquisa sobre modelo parametrizado de ACV para vedações verticais, algumas variáveis para realizar a Análise de Sensibilidade. As alternativas de variações dentro do ciclo de vida do produto, material e serviço foram: I – Tipos de fornos: intermitente, semicontínuo e túnel; II – Tipos de combustíveis: lenha, retalho de móveis, serragem e cavaco de madeira; III – Tipos de secagens: natural, artificial e sem uso do calor do forno; IV – Tipos de traços de argamassa: chapisco e emboço interno e externo; V – Tipos de

espessuras de emboços; e VI – Tipos de blocos. Além disso, a autora ponderou, por falta de dados na literatura, que o processo de reciclagem dos RCD seria de 2%, sendo que no Reino Unido a taxa é de 90%. Portanto, esse processo traria grande variação nos resultados se fosse aplicado com as devidas considerações para outro país.

2.4.4.3 Análise de Incerteza

Semelhante à Análise de Sensibilidade, este procedimento de incerteza é utilizado para investigar através de análises probabilísticas, o quanto seu ICV é confiável, por exemplo, com o uso da Matriz de Qualidade de Dados *Pedigree* (MP) e assim apontar supostas fragilidades. Sua aplicabilidade é essencial para que as tomadas de decisões e interpretações de estudos ACV sejam mais eficientes (CHERUBINI, 2015).

A MP auxilia no gerenciamento de qualidade de dados de ICV, sendo esses dados avaliados conforme cinco indicadores distintos, de forma que seja possível estimar as incertezas das informações utilizadas no inventário e, apresentar para o responsável pela elaboração do estudo ACV, a necessidade ou não de uma melhoria (WEIDEMA; WESNÆS, 1996). No Quadro 13, são apresentados a MP e seus respectivos critérios e pontuações, tendo como 1 (um) a melhor pontuação e 5 (cinco) a pior.

Alves e outros (2020) desenvolveram uma pesquisa relacionada à escassez de água no Brasil, onde avaliaram as incertezas quanto a caracterização da regionalidade. Um dos métodos foi a utilização de uma MP adaptada, pois dependendo do objetivo da ACV é necessária a inclusão de dados com uma variabilidade temporal e séries históricas maiores e que não receberiam uma pontuação adequada quando confrontada com a MP. Para tal pesquisa essas informações foram importantes para realizar uma correta interpretação dos resultados da ACV referente aos impactos ambientais da escassez hídrica das diversas regiões do Brasil.

Dai e outros (2020) propuseram para estudos de ACV com grandes variações geográficas, como produtos agrícolas produzidos em diferentes regiões de um determinado país e épocas do ano, o uso de uma Modelagem Multinível (MLM) ao invés da MP que muitas vezes subestima e não corrige os problemas espaciais e temporais que um determinado banco de dados de ICV possui.

Alves e Ugaya (2018) reforçaram a importância da Análise de Incertezas em trabalhos de ACV. Segundo os autores, essa análise deve ser feita não apenas na fase de ICV, mas também no AICV, principalmente nos cálculos dos resultados dos indicadores de categoria que foram adotados.

Portanto, para melhor reflexão sobre as coerências dos resultados, é necessário checar e informar as incertezas da ACV proposta e comparar os resultados com estudos similares, propondo mais transparência, confiabilidade e subsidiando uma correta interpretação (MORALES et al., 2020).

Quadro 13 – Matriz Pedigree

Pontuação do Indicador	1	2	3	4	5
Confiabilidade	Dados verificados baseado em medições	Dados verificados parcialmente baseados em hipóteses ou dados não verificados baseados em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativas qualificadas (Ex. perito industrial); Dados derivados de informações teóricas	Estimativas não qualificadas
Compleitude	Dados representativos de todos os locais relevantes para o aspecto e com o período adequado para compensar flutuações normais	Dado representativo de um número menor de locais por um período adequado	Dado representativo de um número adequado de locais por um período mais curto	Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e de períodos curtos
Correlação temporal	Menos 3 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade dos dados desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o período de tempo do conjunto de dados
Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área com condições de produção similares	Dados de uma área com condições de produção pouco similar	Dados de área desconhecida ou de áreas com condição de produção muito distintas
Correlação tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais sob estudo (tecnologia idêntica)	Dados de processos e materiais sob estudo (mesma tecnologia), mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais sob estudo, mas de tecnologias diferentes	Dados de processos e materiais relativos	Dados de processos relativos em escala laboratorial ou de tecnologias diferentes

Fonte: Adaptado de WEIDEMA; WESNÆS (1996).

2.4.4.4 Limitações da ACV

Ciroth e outros (2020) entendem que é necessário desenvolver critérios padronizados, tanto para elaborar, quanto para revisar banco de dados de ACV. Os autores apontam que cada banco de dados tem adotado critérios próprios para revisar as informações dos processos ali inseridos. Portanto, eles propuseram critérios globalmente aceitáveis e que considera os aspectos de interoperabilidade e gerenciamento de banco de dados, bem como o feedback recebido de várias partes interessadas, e assim fechar uma lacuna importante na garantia de qualidade do conjunto de dados de ACV.

A obtenção de dados primários (coletados *in loco*) para construção do ICV maximiza a representatividade da pesquisa científica quando comparada e confrontada com os resultados provenientes de outras fontes (literatura ou estimativas). Pois, a forma que é feita a medição desses dados pode ou não influenciar nos resultados acarretando até valores diferentes para um mesmo estudo (RODRIGUES, 2015). Outro limitador que pode influenciar nos resultados da ACV é a fronteira do sistema (PROSKE; FINKBEINER, 2020).

Na fase de Interpretações devem ser consideradas as limitações que foram encontradas, tanto na análise dos dados, quanto na Análise de Sensibilidade (ABNT, 2009b). A fase de AICV pode não refletir diferenças significativas entre indicadores de impactos ambientais em situações que na fase de ICV não seja incluído um processo elementar do ciclo de vida do produto estudado (ABNT, 2009a).

3 METODOLOGIA

Para esta dissertação, foi realizado o levantamento bibliográfico para identificar o estado da arte da utilização de resíduos de rochas e outros minerais para solução ou produção de outro produto de construção civil, também para obter e compreender os conceitos e aplicações da metodologia da ACV, bem como, métodos para estimar impactos ambientais, softwares e banco de dados adotados em outras pesquisas.

Também foi realizada pesquisa de campo com observação em visita ao laboratório do Centro Universitário São Camilo e ao centro de tratamento de resíduos de rochas ornamentais, a Associação Ambiental Monte Líbano (AAMOL).

Foram inseridas as informações a respeito dos dados levantados na realização do inventário dos ciclos de materiais para fabricar o vidro sodo-cálcico e da preparação da LBRO, através de simulações dentro do laboratório do Centro Universitário São Camilo com apoio de bolsista e

técnicos de laboratório. As simulações proporcionaram as definições das proporções dos materiais ao longo de cada etapa para a produção do vidro. Para melhor compreensão da LBRO, foi realizada uma visita à AAMOL identificando a chegada do resíduo e todos os passos dentro desse centro de tratamento. Para os demais dados foram utilizados dados de outras dissertações como a de produção de vidro, concreto e argamassa onde se usou como matéria-prima a LBRO.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

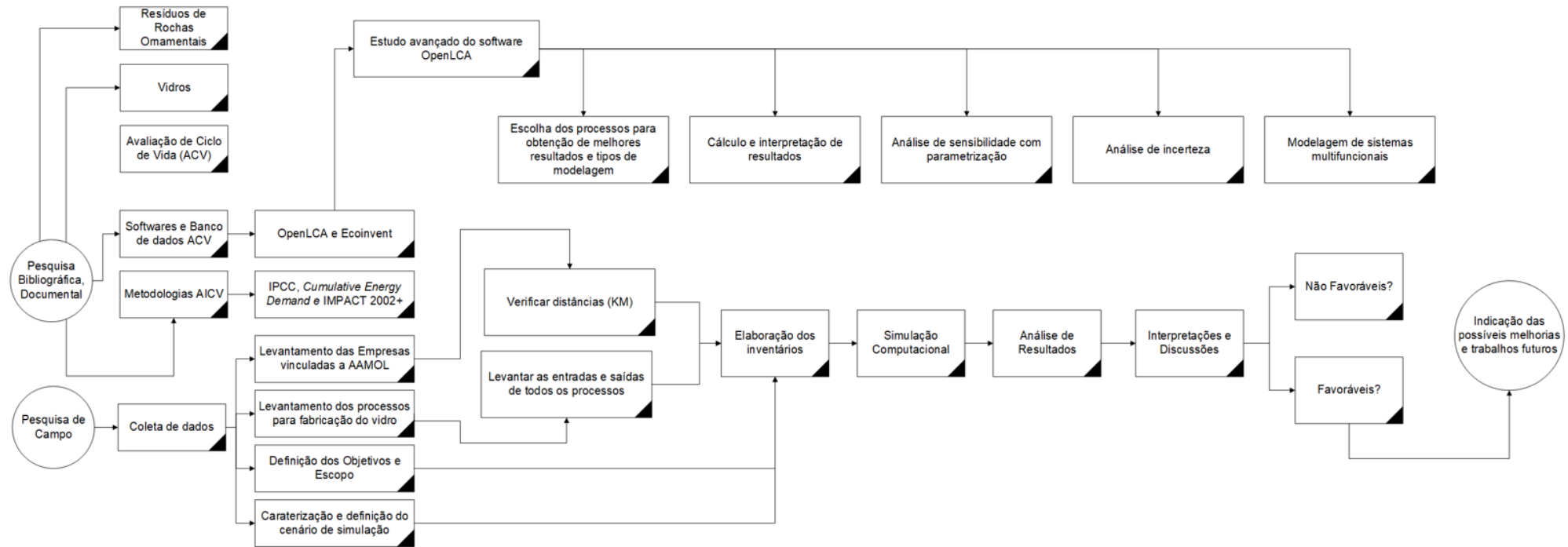
O levantamento bibliográfico foi desenvolvido por meio de pesquisas no Portal de Periódico da Capes, que por sua vez, disponibiliza bases de dados científicas, como a Scielo, Web of Science, Scopus, entre outros, como revistas classificadas com conceito Qualis Capes, sendo previamente verificados pela plataforma Sucupira para área de Engenharias I e demais fontes como: banco de teses, dissertações, que foram utilizados para enriquecer a pesquisa.

Com os descritores “Resíduos Rochas Ornamentais” ou “*Ornamental Rocks Residue*” ou “*Granite Sludge*” ou “*Waste Marble*” ou “*Ornamental Stone Wastes*”, “*Industrial Byproducts*” ou “*Marble Sludge Incorporation*”, “Avaliação Ciclo Vida” ou “*Life Cycle Assessment*” ou “ACV or LCA”, “*Glassmaking*” ou “Fabricação Vidros”, IPCC and CED or LCIA, “Análise Incerteza” or “*Uncertainty Analysis*”, “Análise Sensibilidade” or “*Sensitivity Analyses*” criaram-se sintaxes para realizar pesquisas de publicações nas bases e programas de busca já informadas, abrangendo o período entre os anos de 2010 a 2021. Nos próximos tópicos são apresentados os resultados dessas buscas.

Todo o material foi identificado em programa de planilha eletrônica e conforme foi feita uma pré-análise, a referência foi armazenada no programa computacional *Mendeley*, com a finalidade de gerenciar, fichar referências e serem inseridas, de forma automática, quando assim solicitada nesta dissertação.

Na Figura 10, é representada a síntese dos procedimentos metodológicos e as etapas que foram desenvolvidas nesta dissertação.

Figura 10 – Síntese dos Procedimentos Metodológicos Adotados nesta Dissertação



Fonte: Elaborado própria, 2022.

3.1.1 Resíduos de rochas e outros minerais

Para o tema de resíduos de rochas ornamentais e outros minerais, foi realizado o levantamento bibliográfico em busca de artigos publicados em revistas internacionais A1 para Engenharia I e que abordassem: (1) de resíduos da mineração de rochas e pedras ornamentais; (2) da lama do beneficiamento de rochas ornamentais; e (3) dos produtos ou subprodutos com a utilização de resíduos da mineração, abordando a pegada ambiental. Como resultado dos que foram encontrados, chegou-se aos seguintes artigos que estão apresentados no Quadro 14, referente aos artigos que incorporaram resíduos de rocha ou outros minerais, mas que não foi realizada uma ACV. No Quadro 15, estão os artigos que incorporaram resíduos de rocha ou outros minerais e os autores tiveram a preocupação em verificar os impactos ambientais dessa incorporação, através da aplicação da metodologia ACV. Tanto no Quadro 14 quanto no Quadro 15 foi apresentado um produto ou solução para aplicação dos resíduos.

Os artigos mencionados no Quadro 14, utilizaram resíduos após certo tipo de tratamento ou em combinação de outros elementos químicos ou misturados com outros detritos provenientes também da indústria de rochas para fabricação de um novo coproduto, em grande maioria diretamente relacionados com a construção civil ou correlacionados.

Já em relação a linha de estudo, que é em adotar os resíduos de rochas ornamentais para a produção de vidro, foi observada uma ausência em artigos, apenas Gomes e outros (2020), apresentaram trabalhos nesta linha de pesquisa.

Quadro 14 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Não Realizaram ACV

(continua)

Autores	Resíduos de Rocha ou outros minerais	Produto ou Solução para aplicação dos resíduos
KARACA; PEKIN; DELIORMANLI (2012)	Rochas ornamentais	Classificação dos resíduos
MOSAFERI <i>et al.</i> (2014)	Pedras	Levantamento do possível uso, reciclagem e reutilização dos resíduos na fabricação de pedras
MASHALY <i>et al.</i> (2016)	Mármore	Compósito de cimento e bloco cerâmico
TCHADJIÉ <i>et al.</i> (2016)	Granito	Geopolímero
RANA <i>et al.</i> (2016)	Rochas Ornamentais	Concreto verde
KRUPSKAYA; ZVEREVA; BUBNOVA (2019)	Minério de estanho	Solução ambiental e social no processamento de matérias-primas minerais
MAROTO <i>et al.</i> (2019)	Magnesita e augita	Agregado leve (observou formação de vidros durante o processo)
ALYAMAC; GHAFARI; INCE (2017)	Mármore	Concreto autoadensável
MARVILA <i>et al.</i> (2019)	Mármore	Argamassa de cimento de cal hidratada
ZICHELLA <i>et al.</i> (2018)	Diamantes	Vidro e cerâmica ¹

Quadro 14 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Não Realizaram ACV

(continuação)

Autores	Resíduos de Rocha ou outros minerais	Produto ou Solução para aplicação dos resíduos
CAREDDU; MARRAS; SIOTTO (2014)	Mármore	Papel, borracha e pneus
AL-ZBOON; AL-ZOU'BY (2015)	Mármore e granito	Concreto
VINCO <i>et al.</i> (2017)	Rochas ornamentais	Argamassa
BAEZA <i>et al.</i> (2014)	Mármore	Argamassa
RANA; KALLA; CSETENYI (2015)	Mármore	Concreto
BACARJI <i>et al.</i> (2013)	Mármore e granito	Concreto
SADEK; EL-ATTAR; ALI (2016)	Mármore e granito	Concreto autoadensável
GESOĞLU <i>et al.</i> (2012)	Mármore	Concreto
ULIANA <i>et al.</i> (2015)	Rochas ornamentais	Substituição parcial do cimento
MITTRI (2018)	Pedras ornamentais	Concreto
MUNIR <i>et al.</i> (2018)	Mármore	Blocos
NICOARA <i>et al.</i> (2020)	Mármore	Concreto
VARDHAN; SIDDIQUE; GOYAL (2019)	Mármore	Concreto
HADI; ABDELHADI (2018)	Mármore e granito	Blocos
COBO-CEACERO <i>et al.</i> (2019)	Mármore	Blocos
CINAR; KAR (2018)	Mármore	Compósitos
MAO <i>et al.</i> (2019)	Galvanoplastia	Blocos
MONTEIRO; VIEIRA (2014)	Diversos	Blocos
BUYUKSAGIS; UYGUNOGLU; TATAR (2017)	Mármore	Argamassa
VASHISTHA <i>et al.</i> (2019)	Cal	Concreto e argamassa
ZHANG <i>et al.</i> (2018)	Galvanoplastia	Blocos
XI <i>et al.</i> (2019)	Mármore	Argamassa
KABEER; VYAS (2018)	Mármore	Argamassa
MYMRIN <i>et al.</i> (2019)	Mármore	Compósitos, neutralizar o lodo de esgoto, blocos.
SARANI <i>et al.</i> (2018)	Mosaico	Blocos
TEKIN <i>et al.</i> (2017)	Mármore	Concreto
BALLESTEROS <i>et al.</i> (2019)	Galvanoplastia	Aditivos para cimento
DAHOU; BARBACH; MOUSSAOUITI (2019)	Alumina	Cimento
ALFI; GADO (2016)	Mármore	Cimento
PIZOÑ <i>et al.</i> (2020)	Lodo metalúrgicos	Concreto
ALYOUSEF <i>et al.</i> (2019)	Mármore	Bloco de concreto
KHODABAKHSHIAN <i>et al.</i> (2018)	Mármore	Concreto
TENNICH; KALLEL; OUEZDOU (2015)	Mármore	Concreto
GALETAKIS; SOULTANA (2016)	Rochas ornamentais	Agregados para concreto
CHIANG; YEN; LU (2019)	Gesso	Blocos
GHORBANI <i>et al.</i> (2018)	Mármore e granito	Concreto
COPPOLA <i>et al.</i> (2020)	Rochas ornamentais	Diferentes aplicações sustentáveis
ROY <i>et al.</i> (2020)	Gesso	Compósito
CHOUHAN <i>et al.</i> (2020)	Calcário	Argamassa
SILVA <i>et al.</i> (2019b)	Granito	Argamassa
GOMES <i>et al.</i> (2020)	Granito e quartzito	Vidro
MARQUES <i>et al.</i> (2020)	Granito	Hidrogênio ²
AMARAL <i>et al.</i> (2020)	Pedras Ornamentais	Argamassa
SAHU <i>et al.</i> (2020)	Pedras Ornamentais	Compósitos de polímero
ZICHELLA, L. <i>et al.</i> (2020)	Pedras Ornamentais	Substrato e gesso
BARROS <i>et al.</i> (2020b)	Rochas Ornamentais	Blocos
NASCIMENTO <i>et al.</i> (2020)	Granito	Argamassa

Quadro 14 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Não Realizaram ACV

(conclusão)

Autores	Resíduos de Rocha ou outros minerais	Produto ou Solução para aplicação dos resíduos
GUIMARÃES <i>et al.</i> (2020)	Mármore	Remover metais tóxicos
MARVILA <i>et al.</i> (2020)	Rocha	Reboco de gesso
TRESSMANN <i>et al.</i> (2020)	Mármore	Tinta
TEKIN <i>et al.</i> (2020)	Mármore	Concreto
ROJO-LÓPEZ <i>et al.</i> (2020)	Granito	Concreto autoadensável
Nota de Quadro ¹ - Após a eliminação da água o resíduo poderá ser utilizado nas indústrias de vidro, cerâmica e construção.		
Nota de Quadro ² - O hidrogênio foi produzido acoplado ao sistema eletroquímico a painéis fotovoltaicos (PV) e utilizando eletrólitos alternativos, principalmente poluentes.		

Fonte: Elaboração própria, 2020.

No Quadro 15 é possível perceber a quantidade reduzida de artigos que realizaram a ACV em produtos que incorporaram resíduos de rochas ornamentais e similares. Portanto, mostra-se no mínimo oportuno o desenvolvimento de pesquisas que abordem essa preocupação em avaliar os impactos ambientais de um produto que adotou um resíduo tratado como matéria-prima e assim responder se é vantajosa ou não tal prática de incorporação de resíduos na cadeia produtiva (ZICHELLA, *et al.*, 2020).

Quadro 15 – Artigos que Incorporaram Resíduos e Realizaram ACV

Autores	Resíduos de Rocha ou outros minerais	Produto ou Solução para aplicação dos resíduos
CAPITANO; PERI; RIZZO (2014)	Mármore	Revestimento de mármore
MENDOZA <i>et al.</i> (2014)	Granito	ICV da produção de granito
GIUDICE <i>et al.</i> (2017)	Feldspato	Cerâmica Siciliana
SINGH <i>et al.</i> (2017)	Mármore	Concreto
INGRAO <i>et al.</i> (2014)	Basalto	Concreto
ZULCÃO <i>et al.</i> (2020)	Rochas ornamentais	Concreto, argamassa e blocos
GETTU <i>et al.</i> (2019)	Granito	Concreto
CORCIONE <i>et al.</i> (2018)	Pedra Lecce	Lajes
NAPOLANO <i>et al.</i> (2016)	Zeólito	Concreto leve
ANDRÉ <i>et al.</i> (2014)	Mármore	Concreto

Fonte: Elaboração própria, 2020.

3.1.2 Metodologia ACV

Foi apresentada a metodologia ACV, possibilitando identificar de forma técnica e científica a relevância em verificar a viabilidade ambiental da produção de vidro com a incorporação de resíduos de rochas ornamentais.

Para esta pesquisa, o objetivo quanto à qualidade de dados foi de acordo com as informadas abaixo:

- Confiabilidade [CF]: ordem de prioridade como fonte dos dados: 1) cálculos e estimativas com base nos dados coletados em fábricas no ES ou cálculos em laboratório;

2) dados médios de relatórios nacionais; 3) dados da literatura, em geral; 4) banco de dados;

- Completude [CP]: dados representativos e que considerem flutuações do mercado;
- Correlação temporal [CT]: o ano de 2021;
- Correlação geográfica [CG]: Espírito Santo - Brasil;
- Correlação tecnológica [TEC]: tecnologia disponível no mercado brasileiro, e no estado do ES.

3.1.3 Softwares e banco de dados

Dentre os *softwares* de ACV mencionadas no Tópico 2.4.2, foi adotado a OpenLCA na versão 1.10.3. Sua adoção se fez por vários critérios, tais como: sem custo de aquisição pela fato de ser *software* livre; possui uma diversificada variabilidade tanto para caracterizar os inventários dos produtos, métodos de impactos e fluxos; disponibilidade para estimar, gerar estatísticas e exportar relatórios; possibilidade de avaliar a qualidade dos dados inseridos, disponibilidade do cálculo de AICV, além da possibilidade de realizar CCV e ACV-Social (CAMPOLINA, 2015; ENCICLO, 2015; NETTO; LUCENTE, 2016; LORENÇÃO; SILVA, 2018; MEDEIROS, 2019).

Já em relação ao banco de dados, foi escolhido o Ecoinvent (versão 3.6), por ser utilizado e reconhecido em estudos científicos de ACV e também por conta da disponibilidade de forma gratuita para a Universidade Federal do Espírito Santo. Além disso, contêm informações de diversos sistemas produtivos industriais e de literatura, permitindo que o usuário que está manipulando o banco, consiga ajustar as informações de forma mais apropriada ao cenário que a pesquisa está voltada, além de compreender vários meios de transportes e sistemas de energia, contribuindo assim, para o desenvolvimento de inventários mais próximos da realidade (VINHAL, 2016; REBELLO, 2017).

3.1.4 Métodos de AICV

Para análise de impacto, foram adotados três métodos de AICV, o *Cumulative Energy Demand* (CED) abordando aspectos quanto ao consumo de energia por fontes renováveis e não renováveis, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2013), onde analisou os impactos que causam o aquecimento global e mudanças de temperatura, e o Impact 2002+, este escolhido pela abordagem de múltiplas categorias impactos ambientais (qualidade do ecossistema, saúde humana, recursos e mudanças climáticas), permitindo uma análise mais

completa em relação as pontuais abordagens dos demais métodos e também comparar possíveis discrepâncias do resultado de um método em relação ao outro.

As escolhas ficaram de acordo com os objetivos do projeto, bem como, atendimento ao “Manual de Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos” e ao Relatório de Recomendação de Modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro (IBCT, 2014; IBCT, 2019a).

Portanto, foi orientada a adoção de métodos com abrangência de *midpoint* (impactos) combinados com *endpoint* (danos), como o Impact 2002+, conforme é mostrado no Quadro 6 e por causa dos objetivos pontuais, referentes aos impactos quanto as emissões de GEE, principalmente, do carbono e da verificação da demanda de energia acumulado no processo de produção do vidro, serão utilizados também os métodos IPCC 2013 e CED (IBICT, 2019c; ILCD, 2014).

Os métodos estão de acordo com o Relatório de Estratégias Corporativas de Baixo Carbono para o Setor de Vidros, que tem como objetivo principal identificar dentre os processos produtivos do vidro, pontos que requerem melhorias no segmento industrial, além de contribuir para o desenvolvimento de inventários nacionais e obter para as empresas geração de valor e vantagens competitivas (CNI, 2016).

Além de citar o uso das equações e orientações do IPCC, o relatório cita outro engajamento, estudos de novos *designs* dos fornos de fusão para economia de energia, portanto, utilizar o método de AICV, CED, está corroborando com as estratégias desse setor industrial (CNI, 2016).

Através do uso do *software* OpenLCA e os métodos AICV empregados, bem como os indicadores selecionados, foi possível então, encontrar ao longo do ciclo de vida da produção do vidro sodo-cálcico, através do método IPCC 2013, a quantidade de GEE emitidos em unidades de kg CO₂ eq, após conversão dos demais gases para CO₂. Pelo método CED, verificou o uso direto e indireto de energia (em MJ eq), atribuindo não apenas o consumo de energia por si só, mas a energia por fonte renovável e não renovável, incorporada no ciclo de vida, e através do método Impact 2002+, compilou todos os indicadores ambientais (*midpoints* e *endpoints*) em uma pontuação única (Pt), a fim de realizar uma comparação de produtos, conforme pode ser observada na Figura 8.

3.2 PESQUISA DE CAMPO

Nesta fase da metodologia, compreende a elaboração do ciclo de vida de produção do vidro sodo-cálcico e o levantamento dos inventários com dados coletados em laboratório, visitas técnicas e estimativas de outros autores. Essas informações são relevantes para montagem dos processos dentro do *software* a fim de encontrar os resultados e subsidiar as discussões.

Com o advento da pandemia, visitas técnicas e a comunicação com a associação e indústrias de base de produção do vidro ficou comprometida, dificultando a coleta de informação quanto ao levantamento dos consumos energéticos e as fases de produção para a realidade industrial, portanto, a pesquisa utilizou-se de informações dos equipamentos para a realidade laboratorial.

3.2.1 Inventário do ciclo de vida dos materiais

Para os valores, os cálculos utilizados na obtenção das medidas e quantidades dos materiais necessários para a produção do vidro, na falta de informações primárias, foram utilizados os dados dispostos em literatura, bem como, contidos no banco de dados Ecoinvent. Buscou-se no impedimento de visita técnica, o envio de formulários para a coleta de dados, conforme exemplo no Anexo A (ZULCÃO, 2018). No entanto, o momento atípico da pandemia também dificultou a colaboração dos fornecedores, portanto, os dados foram coletados, verificando empresas/indústrias do ramo e com dados disponibilizados na internet e trocas de *e-mails*.

No Apêndice B é apresentado um exemplo de como foi a montagem de cada processo do inventário, posteriormente foi criado e apresentado no Apêndice C, um quadro geral contendo todos os processos utilizados para a realização da dissertação antes da inserção dos dados no *software*. Para cada processo foram informados os fluxos (entrada e saída), a fonte adotada e a Matriz *Pedigree* (Análise da Qualidade).

No Centro Universitário São Camilo, foram realizados toda preparação, misturas, demais testes e parte dos processos referentes ao ciclo de vida do vidro (BASTOS, 2018) para a produção de 1Kg de vidro sodo-cálcico com LBRO e do vidro sodo-cálcico com a matéria-prima convencional. Na Tabela 3, é exposta a composição das misturas para produção do vidro.

Tabela 3 – Composição das Misturas dos Vidros Sodo-cálcico (em g)

Misturas	LBRO	RQ	Na ₂ CO ₃	CaCO ₃	K ₂ CO ₃	MgCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₂
M1	604,7	114,8	206,8	157,2	102,8	-				
M2	-	-	222,3	196,4	4,4	4,18	740	15	2	2

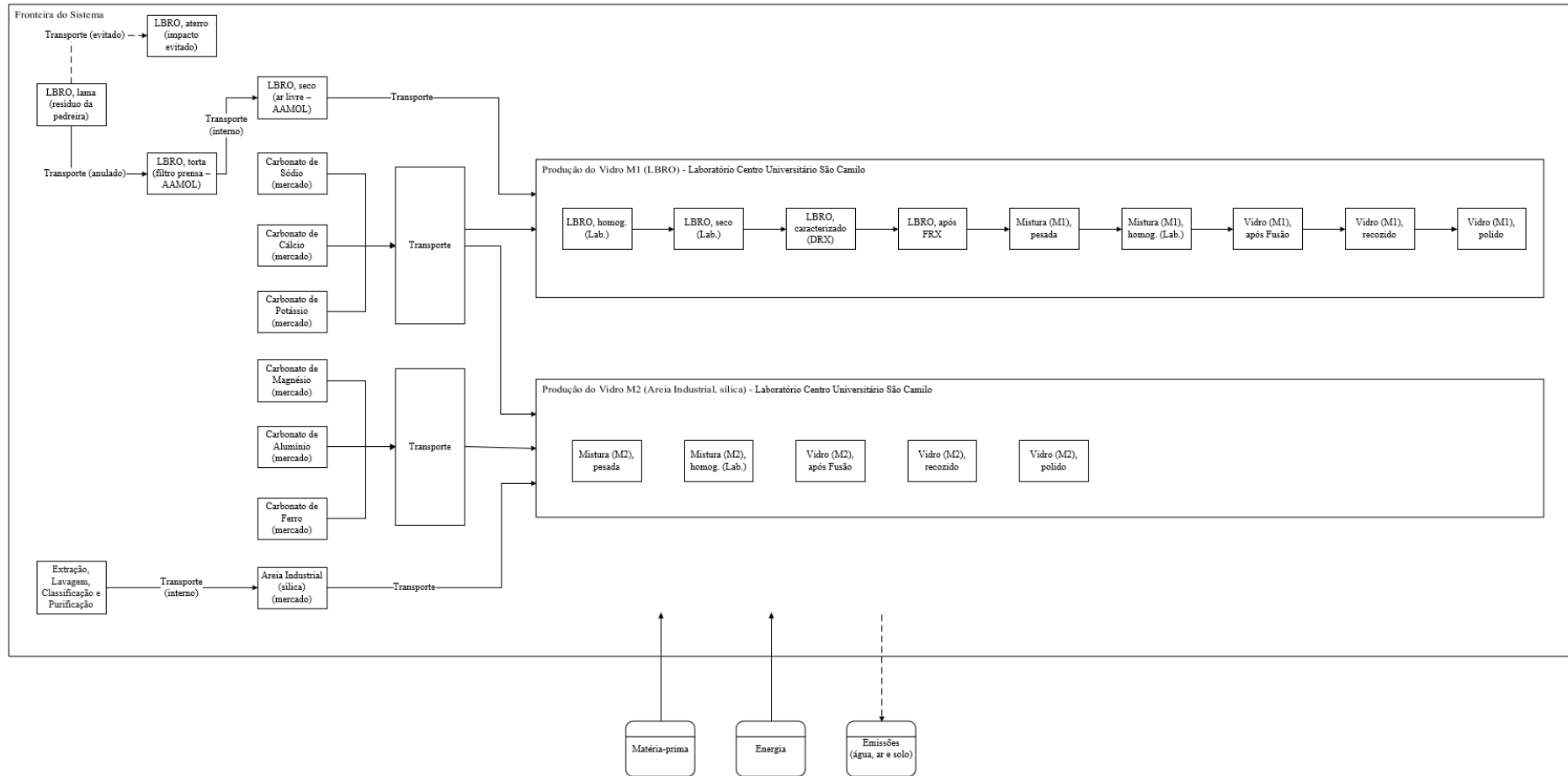
Fonte: Elaboração própria, 2021.

Para fins de comparação, a mistura M2 é referente a composição de vidro comercial sodocálcico para aplicação de embalagens por Shelby (2005). Entre as composições comerciais existentes, foi escolhido o vidro de Shelby por apresentar coloração âmbar que usualmente é utilizado para envasar medicamentos, além do processo de produção, utilizando temperatura similar a temperatura que o forno do laboratório do Centro Universitário São Camilo consegue atingir (1200 – 1500°C).

Cabe salientar que, nesta dissertação, não foram considerados os impactos ambientais gerados no beneficiamento de rochas ornamentais, estes estão fora da fronteira do sistema. O processo se inicia com o resíduo, no caso, a LBRO ainda no estado de lama, geradas nas pedreiras e que foram transportadas até a central de tratamento de lama abrasiva. Portanto, das rochas ornamentais, apenas foram levantados os inventários dos processos de transportes do resíduo até o centro de tratamento em diante.

Na Figura 11, é possível verificar a fronteira do sistema e os processos que contemplam o ICV desta dissertação. Neste caso, inicia-se com o transporte dos insumos até no laboratório do Centro Universitário São Camilo, onde o vidro foi produzido.

Figura 11 – Fronteira do Sistema



Fonte: Elaboração própria, 2022.

3.2.2 LBRO⁸ e RQ

A LBRO é destinada, na maioria das vezes, aos centros de tratamento, devido ao alto custo de implantação de um sistema prévio de tratamento, como o filtro prensa (o modelo apresentado na Figura 13a, teve um custo de R\$ 400.000,00 reais) (ZULCÃO, 2018) ou pelo tempo que levaria para desidratar a lama, no caso de utilização de um sedimentador horizontal.

Foi adotado como ciclo de processo da LBRO desde a chegada a AAMOL até o resíduo tratado, a seguinte ordem (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007; ZULCÃO, 2018):

- 1) Descarregamento dos caminhões-caçambas nas células de deposição do resíduo;
- 2) Recalque do tanque de decantação ao sedimentador vertical;
- 3) Saída do sedimentador para batedor de lama;
- 4) Recalque do batedor de lama ao filtro prensa;
- 5) Descarregamento pelo filtro prensa do resíduo desidratado em formato de torta;
- 6) Transporte à área de secagem ao ar livre;
- 7) Movimentação do material para secagem;
- 8) Transporte ao pátio coberto;
- 9) Coleta do resíduo e transporte até o laboratório de secagem, destorroamento, pesagem e homogeneização.

De acordo com Zulcão (2018), a umidade da LBRO é modificada ao passar pela sequência dos processos mencionados acima. No estágio 1, a umidade aproxima-se de 70%, no estágio 4, é próximo de 30%, já no estágio 5 é cerca de 15% e, por fim, 4% quando seco ao ar livre. Ou seja, a LBRO inicia com um peso médio de 1,478 kg (estado fluido) e ao passar pelo estágio do filtro prensa, resulta em 1 kg de LBRO e 0,478 L de água⁹ (Figura 13g). O processo de secagem pelo filtro prensa resulta em um consumo energético de 0,592 kWh/t de LBRO (15% umidade). Esse valor leva em consideração a capacidade de filtragem do maquinário de acordo com seus

⁸ As informações contidas neste tópico foram extraídas da dissertação de mestrado de Zulcão (2018) e Bastos (2018) através do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, ambos programas da Universidade Federal do Espírito Santo. Além disso, as demais informações foram levantadas em visita técnica realizada em 2020 na AAMOL.

⁹ Constância de massa. Sendo massa total = massa seca x (1+h), 1 kg LBRO com 15% de umidade apresenta 1/1,15 de massa seca. Já 1 kg LBRO com 70% de umidade apresenta 1/1,7 de massa seca. Logo, para constância de massa do LBRO no processo, entra 1,7/1,15 kg de LBRO com 70% de umidade para saída de 1/1,15 de massa seca (o mesmo que 1 kg LBRO com 15% de umidade). Onde: h (%) = teor de umidade

ciclos de duração até que a lama seja filtrada, além da densidade do resíduo, potência da bomba de recalque que lança a LBRO fluida até as placas filtrantes.

Para o processo de secagem de ar livre e destorroamento, é necessário o deslocamento de cerca de 1,5 km da LBRO do filtro prensa até o pátio para secagem através de transporte e maquinário, tendo um consumo médio de diesel de 9,2 l/h e consumo de energia elétrica de 0,156 kWh/t no processo de destorroar. No entanto, para esta dissertação, o gasto energético para destorroamento, ainda no centro de tratamento do resíduo, não foi computado, pois a LBRO foi coletada no pátio da AAMOL e o processo de destorroar o material foi compreendido entre os processos de secagem ao ar livre e homogeneização da LBRO no laboratório do Centro Universitário São Camilo.

Em relação ao resíduo de quartizo (RQ), ele foi tratado na própria pedreira, que fica localizada em Morro Branco, no município de Vargem Alta-ES. Quanto ao processo de tratamento do RQ, foi adotado o mesmo ciclo realizado pela AAMOL para a LBRO, com a diferença que o resíduo é gerado na própria jazida e não proveniente de outras empresas de atividade de lavra. Portanto, foi computado apenas o transporte interno do resíduo do quartzito para o local em que é realizado o tratamento, ou seja, os mesmos 1,5 km.kg adotados para levar a LBRO para a área de secagem dentro AAMOL.

Na Figura 12 são exibidas as imagens das amostras da LBRO e do RQ.

Figura 12 – Amostras de RQ e LBRO após Tratamento



Fonte: Acervo pessoal, 2020.

Na Figura 13, é demonstrado o ciclo de vida da LBRO dentro da AAMOL. Nela é possível observar as suas fases internas, como equipamentos, meios de transporte através da legenda: a) caminhão pipa depositando a lama no tanque de decantação; b) vista do batedor de lama e do tanque de decantação; c) sedimentador vertical; d) vista de frente da queda da lama do filtro prensa até o solo; e) placas filtrantes do filtro prensa; f) vista superior do despejo da lama filtrada ao solo; g) lama no formato torta; e h) trator com plaina niveladora no pátio de secagem da LBRO.

Figura 13 – Ciclo de Vida da LBRO na AAMOL



Fonte: Acervo pessoal, 2020.

3.2.3 Sílica (SiO₂)

Quanta a sílica ou areia industrial, ela é proveniente de extração e beneficiamento de areia por diferentes maneiras. Para a pesquisa, a areia adotada para produção de vidro foi produzida em Analândia/SP; nesta fábrica são produzidas areias quartzosas e sílica moída. A sílica é vitrificante, sendo a principal matéria-prima para a produção do vidro. Por exemplo, nos Estados Unidos, ela representa aproximadamente 40% do material utilizado na indústria de vidro e, no Brasil algo próximo de 65% (LUZ; LINS, 2005).

No banco de dados, foi adotado o material *silica sand*. O gasto energético para a obtenção de 1 (uma) tonelada de sílica (obtida diretamente da mina) é de 2,61 Kg CO₂ eq (MMA, 2013). Rebello (2017) adotou o uso da areia através do método de dragagem em duas situações: leito do rio e cava submersa. Portanto, para a areia do leito do rio, o processo completo (lavra, beneficiamento e estocagem) compreendeu um consumo de 15,16E-02 MJ de diesel, além do consumo de água de 2,22E-06 m³. Para a situação de cava submersa, teve um consumo de 7,41E-02 MJ e 1,30E-04 kWh referente a diesel e energia elétrica respectivamente. Já para esta dissertação adotou-se o método de cava seca (onde a lavra é feita através de desmonte mecânico em uma mina). As etapas para que seja produzida, neste caso, a areia industrial (sílica), pela empresa adotada são: extração, lavagem, classificação e purificação.

De acordo com Vieira e Rezende (2015, p.185), o transporte do material corresponde na faixa de 1/3 a 2/3 do custo final do produto. Já em relação aos impactos ambientais desse segmento industrial, alguns danos causados estão ligados ao:

desmatamento de áreas de preservação permanente para implantação de caixas, pátios e acessos; a alteração dos cursos dos rios e o seu assoreamento causado pela deposição de solo no fundo do rio pela ausência da mata ciliar para segurar o solo das margens; os ruídos na operação de dragas; compactação do solo causada pela retirada da mata e o trânsito de máquinas; a fuga da fauna como consequência do barulho e movimentação no local; a poluição das águas com o uso inadequado de combustíveis fósseis e as queimadas (VIEIRA; REZENDE, 2015, p185).

3.2.4 Carbonato de Sódio (NaCO₃)

O carbonato de sódio é uma das mais importantes matérias-primas para a produção do vidro. Através desse carbonato, é fornecida uma carga de óxido de sódio ao vidro, reduzindo o ponto de fusão da sílica. A barrilha é a principal fonte de carbonato de sódio e o terceiro principal carbonato utilizado para fabricar o vidro. Ela pode ser encontrada de duas formas, a primeira

de origem natural ou trona, um mineral encontrado em locais de clima desértico ou na forma artificial, chamado de Solvay (AKERMAN, 2014).

Tanto na origem natural ou artificial, o carbonato de sódio é um item custoso. O primeiro, por conta da extração e do transporte do material das jazidas até a fábrica de vidro. Já o de origem artificial, que é obtido pelo processo Solvay e, precisa ser importado, pois não existe fábrica desse carbonato através do processo Solvay aqui no Brasil, também é um insumo caro (AKERMAN, 2014).

Como o intuito da pesquisa não é levantar e quantificar os impactos ambientais dos processos para a fabricação do carbonato de sódio, foram adotados os dados do banco Ecoinvent para esse processo *soda ash, dense*, e inserido como fornecedora uma multinacional instalada no Brasil com seu depósito instalado em Itatiba/SP. No entanto, esses dados do banco de dados foram adaptados (transporte, energia e água) para a situação brasileira, ou seja, adotou processos com referência brasileira ou que poderiam ser utilizados em adaptação no Brasil, como o do transporte por meio de caminhão (*transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3*), energia (*electricity, medium voltage, at grid/BR U*) e água (*water, unspecified natural origin, BR*).

Para o mesmo carbonato outros autores adotaram diferentes tipos de processos disponíveis no banco Ecoinvent, como Ugreen (2020), que adotou em seu estudo de ACV sobre a fabricação de porcelanatos como matéria-prima para o carbonato de sódio, o percarbonato de sódio em pó (*Market for sodium percarbonate, powder*). Appel (2019) adotou no ACV de produção de malha têxtil de algodão, o *Sodium carbonate from ammonium chloride production, at plant*. Já a pesquisa de Souza (2012) adotou a *soda ash*, tendo como foco uma ACV sobre os constituintes dos fluidos de perfuração de poços de petróleo. A utilização de diferentes fluxos de produtos no banco de dados para determinar um mesmo produto, pode acarretar diferentes resultados, principalmente, quando não ajustados para matriz energética e transporte do país de estudo.

De acordo com o IPCC (2006), o fator de emissão para produzir uma tonelada de soda é de 0,41492 toneladas de CO₂ eq.

3.2.5 Carbonato de Cálcio (CaCO₃)

Na Figura 14 são exibidas as imagens das amostras de carbonato de cálcio e do carbonato de magnésio.

Figura 14 – Amostras de CaCO₃ e MgCO₃



Fonte: Acervo pessoal, 2020.

A calcita é uma das principais fontes de carbonato de cálcio, proporcionando estabilidade ao vidro. Adotou o produto proveniente de uma empresa localizada em Cachoeiro de Itapemirim/ES. O produto atende os requisitos químicos, físicos, além da granulometria para a produção de vidros.

O material no banco de dados é o *calcite*, respeitando as características de produção brasileira, o que envolve matriz energética, transporte e combustível. De acordo com o IPCC (2006), o fator de emissão de uma tonelada de calcita é de 0,43971 toneladas CO₂ eq.

3.2.6 Carbonato de Potássio (K₂CO₃)

O carbonato de potássio, também é conhecido como sal branco ou potassa, é utilizado em diversos segmentos industriais para produzir diversos produtos como o vidro, sabão, porcelana e alimentos. No vidro é também utilizado como fundente e substitui parcialmente o carbonato de sódio. As rochas silicáticas são ricas em potássios (MARINI, 2016).

O material no banco de dados, é identificado como *potassium carbonate*, respeitando as características de produção brasileira, o que envolve matriz energética, transporte e combustível. De acordo com o MMA (2013), o índice de emissões para extrair na forma bruta uma tonelada de potássio é de 7,9 Kg CO₂ eq.

3.2.7 Carbonato de Magnésio (MgCO₃)

O magnésio também é extraído da dolomita e tem uma diversidade final quanto ao seu uso, por exemplo: lingotes de magnésio metálico, diferentes ligas, magnésio em pó e dessulfurantes à base de magnésio e peças fundidas em ligas de magnésio. Quanto ao uso na produção de vidro, o magnésio, tem a função de proporcionar a capacidade em suportar mudanças bruscas de temperatura (RIMA, 2021; BRASIL MINAS, 2021).

Estudos quanto ao processo de produção do magnésio estimam que, em média, as tecnologias adotadas atualmente, a eletrolítica e Pidgeon, emitem cerca de 14 Kg CO₂ eq e 21,8 Kg CO₂ eq de magnésio, respectivamente. É um segmento industrial, que desenvolve estudos e relatórios, como a ACV, através da *Internatiol Magnesium Association (IMA)*, para encontrar medidas de tornar o processo produtivo mais eficiente energeticamente e menos impactante ambientalmente. Já existe um estudo de caso brasileiro, em que, a empresa conseguiu reduzir em 38% e 56% as emissões de CO₂ eq. respectivas aos processos informados. No entanto, quando se avalia apenas as emissões referentes ao carbonato de magnésio, provenientes da dolomita, seu índice de emissão por tonelada do material é de 0,47732 tonelada de CO₂ eq (IPCC, 2006; EHRENBERGER, 2020; EHRENBERGER; TAUBER, 2021).

A empresa adotada como fornecedora do material é localizada no município Cachoeiro de Itapemirim/ES e o seu carbonato de magnésio é proveniente da extração ao beneficiamento da dolomita na região. O material no banco de dados é identificado como *magnesium oxide*, respeitando as características de produção brasileira, o que envolve matriz energética, transporte e combustível.

3.2.8 Demais matérias e carbonatos utilizados

Além dos materiais já citados, foram utilizados os carbonatos de alumínio e ferro, bem como o dióxido de enxofre. Esses especificamente utilizados na composição do vidro Shelby, que foi utilizado como vidro tradicional e comparado com a mistura M1. Não foram adotados aqui os cacos de vidro, material bastante utilizado na produção de vidro.

Na Tabela 4, constam as informações quanto ao cenário de transporte de cada um desses materiais. Já em relação ao banco de dados, foram adotados, respectivamente, e ajustados conforme característica do Brasil, o *aluminium oxide, ferric* e o *oxidee sulphur trioxide*.

3.2.9 Caracterização e definição do cenário para simulação da ACV

Neste tópico¹⁰, são apresentadas as informações referentes aos cenários de transporte das matérias-primas necessárias para a produção do vidro até o Centro Universitário São Camilo. Todos os transportes são realizados através do modal rodoviário e foram priorizadas as indústrias ou jazidas mais próximas do endereço da faculdade.

A LBRO é depositada por 72 empresas do ramo de mineração do sul do estado do Espírito Santo na AAMOL¹¹, situada na Fazenda Monte Líbano, no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES, rodovia do contorno, Km 03, s/n. Levando em consideração que as empresas, ao transportar os resíduos para a unidade de tratamento, estão deixando de transportar o mesmo resíduo para o aterro sanitário, os transportes serão anulados devido a esse impacto ambiental evitado.

Ademais, para realização da Análise de Sensibilidade, foram abordadas duas situações para o impacto ambiental do transporte. A primeira análise, foi do transporte da LBRO já tratada, que partiu do pressuposto que em cada macrorregião do estado do Espírito Santo possui uma central de tratamento (CT), com processos similares ao abordado deste estudo. Adotou-se como ponto de origem quatro municípios que realizam o beneficiamento de rochas ornamentais em diferentes macrorregiões do estado (Figura 15) até o ponto de destino, Cachoeiro de Itapemirim/ES, onde foi produzido o vidro¹².

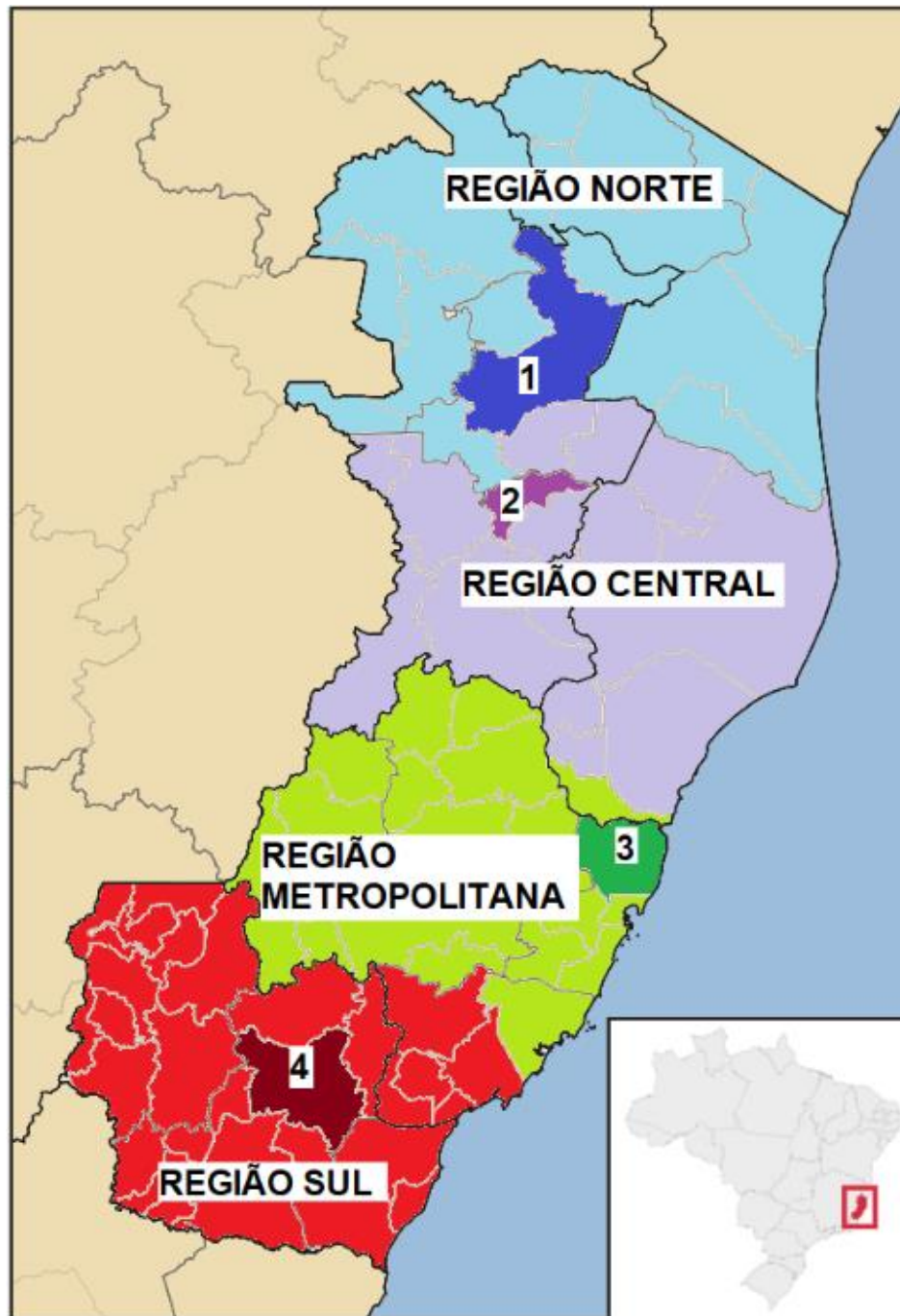
As distâncias foram calculadas através do programa *online Google Maps*.

¹⁰ As informações extraídas da dissertação de mestrado Bastos (2018) através do Programa de Pós-Graduação de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo.

¹¹ Central de Tratamento de Resíduos gerados no processo produtivo de beneficiamento de rochas ornamentais para receber, principalmente, os efluentes industriais (a lama descartada) no processo, buscando transformá-los em subprodutos e possibilitando, assim, o reaproveitamento em outras cadeias produtivas (ROCHA, 2015, p. 17).

¹² De acordo com o site (<https://abividro.org.br/industria-vidro-associados/>) da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO), não existem até a presente data (23 de junho de 2021), indústrias de vidro no estado do Espírito Santo.

Figura 15 – Municípios de Acordo com Macrorregiões de Planejamento do Espírito Santo



Fonte: Adaptado de Zulcão (2018).

Nota da Figura – Localização das centrais de tratamento de resíduo: 1. Nova Venécia; 2. São Domingos do Norte; 3. Serra; e 4. Cachoeiro de Itapemirim.

No programa OpenLCA, foi adotado o caminhão EURO3 com capacidade de 16 a 32 toneladas disponível no banco Ecoinvent, esse comparado com um caminhão caçamba. Foi adotado esse transporte por causa da compatibilidade com a realidade brasileira e por ter sido utilizado em outras pesquisas de transportes de agregados e água e outros fluidos (CASTRO et al., 2015; ZULCÃO, 2018). Já a fornecedora da areia industrial (sílica), conta com caminhões rígidos de 40t com semirreboque, também de 40t, tendo capacidade total de 80t por viagem (JANUÁRIO,

2018), portanto, para este caso, foi adotado o caminhão EURO3 com capacidade acima de 32 toneladas.

Na tabela 4, são apresentadas as distâncias de transporte de cada uma das matérias-primas já identificadas. Foram considerados o cálculo médio da distância (KM) de ida e volta das possibilidades encontradas no programa mencionado, desconsiderando que o caminhão na ida é mais pesado que o da volta, visto que, o mesmo retorna vazio. No Apêndice A é possível obter o endereço completo de cada origem e do destino.

Tabela 4 – Distância de Transporte dos Materiais para Produção do Vidro tendo Diferentes Pontos de Origem da LBRO

Materiais	Origem	Destino	Distância final (KM)
LBRO	Nova Venécia/ES; São Domingos do Norte/ES; Serra/ES; Cachoeiro de Itapemirim/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	779; 685; 324; 28
RQ	Vargem Alta/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	70
Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)	Itatiba/SP	Cachoeiro de Itapemirim/ES	1700
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	Bom Sucesso de Itararé/SP Cachoeiro de Itapemirim/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	1161 50
Carbonato de potássio (K ₂ CO ₃)	Rio de Janeiro/RJ	Cachoeiro de Itapemirim/ES	838
Carbonato de magnésio (MgCO ₃)	Cachoeiro de Itapemirim/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	50
Dióxido de silício (SiO ₂)	Analândia/SP	Cachoeiro de Itapemirim/ES	964
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	São João da Boa Vista/SP	Cachoeiro de Itapemirim/ES	1756
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	Vitória/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	310
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Araçari/SP	Cachoeiro de Itapemirim/ES	1742

Fonte: Elaboração própria, 2021.

Já a segunda Análise de Sensibilidade de transporte, está em verificar (sabendo que no ES não existem indústrias de produção do vidro) se é viável transportar a LBRO tratada para uma das indústrias desse segmento, portanto, foi adotada uma indústria mais próxima do ES, localizada em Jacutinga/MG, conforme mencionado na Tabela 5.

Tabela 5 – Distância de Transporte da LBRO tendo como Referência uma Fábrica no ES e outra em MG

Materiais	Origem	Destino	Distância final (KM)
LBRO	Cachoeiro de Itapemirim/ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	66
		Jacutinga/MG	865

Fonte: Elaboração própria, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até novembro de 2021, o estado do Espírito Santo, exportou sozinho mais rochas ornamentais que todo o país em 2020. Tendo um faturamento de 1,01 bilhão de dólares e um aumento de 37,31%, quando comparados com o mesmo período de 2020 (SINDIROCHAS, 2021). Portanto, com o aumento de produção, a geração de resíduos tende a crescer da mesma forma, ou seja, pesquisas quanto ao uso alternativo da LBRO e RQ tratados, como material de construção civil substituto ou parcial de um material convencional, devem ser encorajadas principalmente no meio acadêmico como forma de subsidiar as indústrias, bem como legisladores, quanto a reflexão do problema ambiental, a necessidade de realizar o tratamento e a reinserção da LBRO como fonte de matéria-prima para outro produto.

4.1 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO VIDRO COM A LBRO

Foram analisados os processos da produção do vidro, que adotou os resíduos de rochas ornamentais em substituição da areia industrial (sílica), com o objetivo de encontrar os processos que possuem os maiores impactos ambientais. Não foram contabilizados nesta avaliação, os impactos de transporte dos materiais e os processos da central de tratamento do resíduo.

A primeira análise foi realizada pelo método CED (demanda de energia incorporada), este que é adotado para investigar a energia utilizada no ciclo de vida de um determinado produto, seja energia renovável ou não renovável e de acordo com seus oito indicadores (fóssil, nuclear, biomassa, eólica, solar, geotérmica, água e floresta primária). Portanto, o cálculo de impacto leva em consideração a quantidade de energia retirada do meio ambiente e expresso em unidade de Megajoules equivalentes (MJ eq).

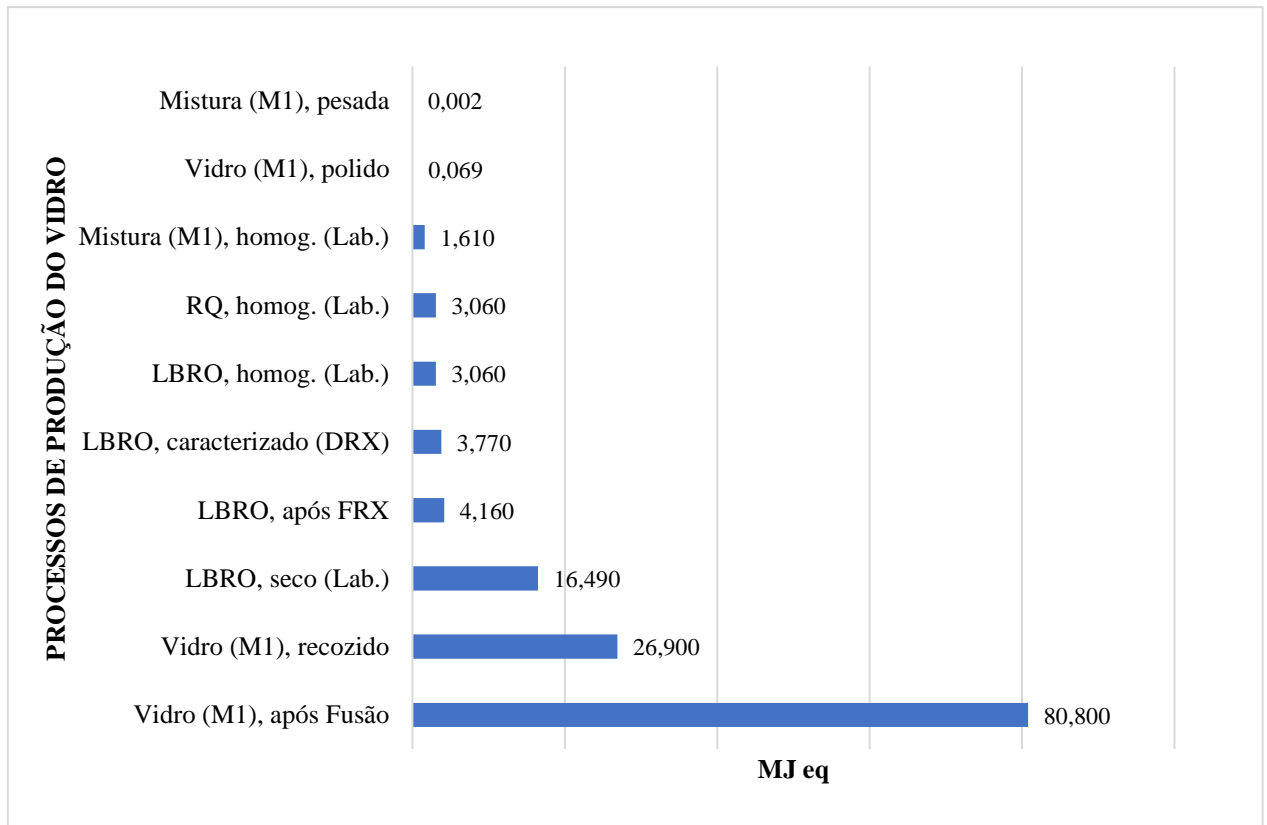
Os resultados apresentados no Gráfico 4 do método CED, mostram que os três principais processos que geraram um maior consumo de energia e conseqüentemente os maiores impactos foram na sequência: o “Vidro (M1), após a fusão” (80,080 MJ eq), “Vidro (M1), recozido” (26,90 MJ eq) e o “LBRO, seco (Lab.)” (16,49 MJ eq).

Para o processo “Vidro (M1), após a fusão”, foi utilizado o equipamento forno, esse que, combinada sua potência em relação a temperatura adotada para a fusão dos materiais e formação vítrea, demandou um maior consumo de energia, 12,93 kWh. O segundo processo de maior impacto nessa análise, “Vidro (M1), recozido”, também adotou o forno para o recozimento do

material vítreo a fim de remover as possíveis tensões e minimizar o risco do material vítreo estilhaçar, portanto, da mesma forma, o forno demandou 4,31 kWh. Já o terceiro processo, “LBRO, seco (Lab.)”, teve como fluxo de saída a LBRO seca, após remoção da água através do uso do equipamento estufa e que consumiu 2,64 kWh.

Analisando os resultados do método CED, os dois primeiros processos de maior impacto somados foram responsáveis por 77% do impacto total dos processos de produção do vidro, e a secagem da LBRO representou 12% do impacto total. Portanto, fica evidente, quanto maior o consumo de energia, maior será o impacto neste método AICV.

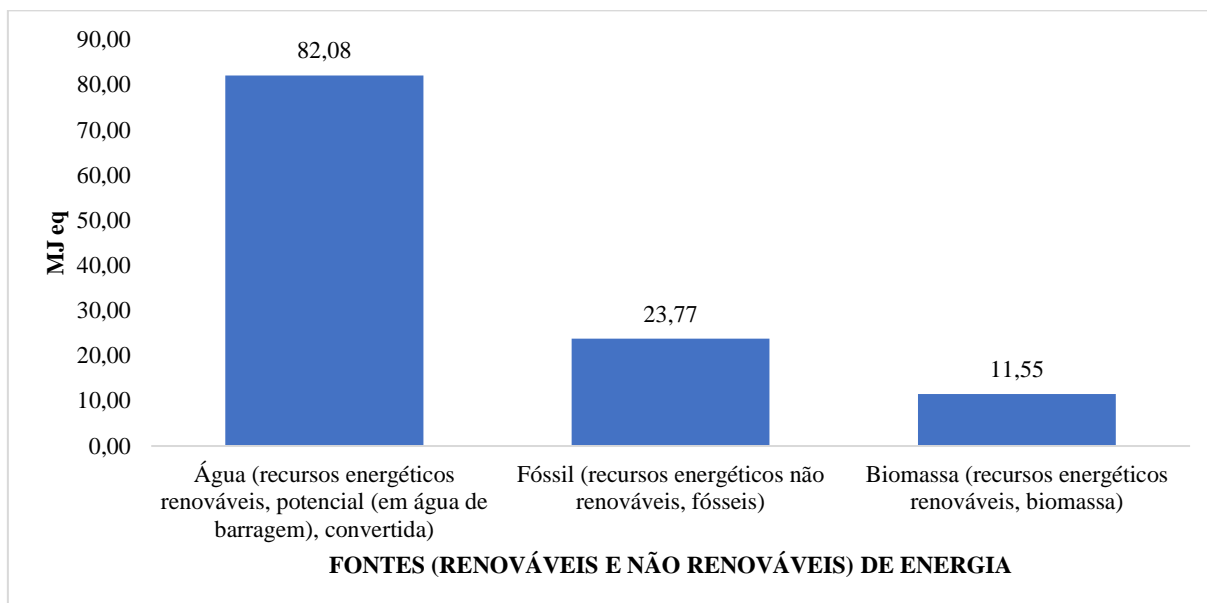
Gráfico 4 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório pelo Método CED



Fonte: Elaboração própria, 2022.

O fluxo de energia referente à eletricidade, adotado nos processos de produção do vidro LBRO, foram o do banco Ecoinvent com a descrição “*Electricity, medium voltage [BR]*”, ou seja, “Eletricidade, média tensão”. Essa eletricidade é proveniente de fontes de energia renovável e não renovável, ondem também foram aferidos os impactos ambientais conforme a fonte de energia. Para tal, no Gráfico 5, são apresentados os resultados do método CED quanto às fontes de energia

Gráfico 5 – Resultados dos Impactos Ambientais do Método CED por Fonte de Energia para a Produção do Vidro LBRO



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Como foi adotada a eletricidade, conforme a matriz energética brasileira, as três fontes que foram apresentadas no gráfico foram Água e a Biomassa (renováveis) e o Fóssil (não renovável). Nota-se que o indicador “Água” tem o maior impacto, seguindo a tendência por consequência da hidráulica ser predominante na matriz energética brasileira, posteriormente aparecem os indicadores Fóssil e da Biomassa.

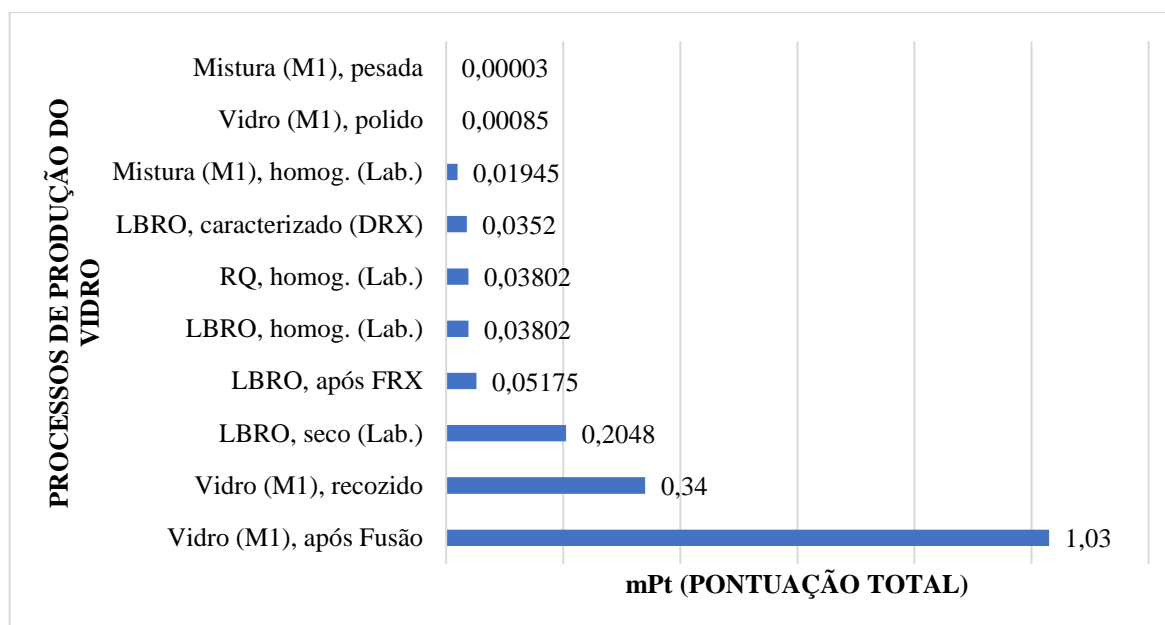
Mesmo com a maior relevância para a fonte de energia “Água”, a adoção de processos industriais do banco Ecoinvent, culminaram no aparecimento de energia à base de fonte Fóssil (carvão mineral, gás natural e os produtos à base de petróleo) e de energia proveniente da fonte Biomassa.

No Espírito Santo, de acordo com o Relatório de Balanço Comercial 2020, ano base 2019, as fontes energia primárias, adotadas para consumo final para os segmentos industriais, de modo geral foram: 1.068 mil Toneladas Equivalente de Petróleo (tep) de gás natural, 954 mil (tep) de carvão metalúrgico, 548,2 mil (tep) gás natural úmido e 218,7 mil (tep) para produtos do derivado da cana (ARSP, 2021).

Já no Gráfico 6, são apresentados os resultados conforme o método Impact 2002+. Por esse método é possível estimar os impactos ambientais, tanto pelas categorias de impactos *midpoint*, quanto categorias de *endpoint*. Os resultados podem ser normalizados em pontuação única ou caracterizados conforme suas unidades de medida que a categoria propõe (kg CO₂ eq, m²a, m³, kg *oil* eq, entre outros).

No Gráfico 6, primeiramente foram convertidas e ponderadas todas as categorias de impactos que o método propõe para uma pontuação única (*single score*) de impactos e que tem como unidade de medida pontos ou (Pt), também ilustrada na Figura 7.

Gráfico 6 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório pelo Método Impact 2002+



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Portanto, no Gráfico 6, o valor apresentado trata-se da soma de cada impacto de *endpoint* (em Pt) detalhada na Tabela 6 e, posteriormente, sumarizadas todas as categorias em um total geral (em Pt), a fim de encontrar um valor único. No entanto, quando os resultados apresentarem número menores, é possível representar o impacto com a unidade mPt, isso significa que o resultado em Pt foi multiplicado por 1000.

Conseqüentemente, ao correlacionar os impactos em unidades Pt, permitiu comparar os processos da produção de vidro LBRO, adotando uma única unidade de medida, ou seja, normalizado. Dessa forma, os processos “Vidro (M1), após fusão”, “Vidro (M1), recozido” e o “LBRO, seco (Lab.)” foram novamente os três processos que geraram os maiores impactos.

No entanto, nessa análise, os processos que apareceram em seguida foram o “LBRO, após o FRX” e o “LBRO, homog. (Lab.)”, já no método CED, foram o “LBRO, após o FRX” e o LBRO, caracterizado (DRX), que apareceram como quarto e quinto processo de maior impacto gerado. O fato dessa mudança está que no método CED o foco na análise da demanda no consumo de energia e o método Impact 2002+ envolvem variáveis de impactos envolvendo outras questões ambientais, não apenas energia.

Na Tabela 6 foram apresentados os resultados do mesmo método, mas conforme as categorias de impactos de *endpoint* em pontuação única, no entanto, dessa vez, diferente do Gráfico 6, destrinchadas.

Tabela 6 – Resultado de cada Processo da Produção do Vidro LBRO em Laboratório em cada Categoria de Impacto do Método IMPACT 2002+ (Single Score)

Categoria de Impacto	Vidro (M1), após fusão (mPt)	Vidro (M1), recozido (mPt)	LBRO, seco (Lab.) (mPt)	LBRO, após FRX (mPt)	LBRO, homog. (Lab.) (mPt)	RQ, homog. (Lab.) (mPt)	LBRO, caracterizado (DRX) (mPt)	Mistura (M1), homog. (Lab.) (mPt)	Vidro (M1), polido (mPt)	Mistura (M1), pesada (mPt)
Saúde humana (total)	0,4	0,13	0,0811	0,0205	0,01505	0,01505	0,01852	7,68E-03	3,38E-4	1,04E-05
Recursos (total)	0,28	0,092	0,0562	0,0142	0,01043	0,01043	0,01283	5,32E-03	2,34E-04	7,23E-06
Mudanças climáticas (total)	0,26	0,09	0,0499	0,0126	9,27E-03	9,27E-03	0,00114	4,73E-03	2,08E-04	6,43E-06
Qualidade do ecossistema (total)	0,09	0,03	0,0176	4,45E-03	3,27E-03	3,27E-03	4,02E-03	1,67E-03	7,34E-05	2,27E-06
Total geral	1,03	0,34	0,2048	0,05175	0,03802	0,03802	0,03651	0,01945	0,00085	0,00003

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Os dados da Tabela 6 representam os resultados totais para cada categoria *endpoint*, no entanto, para chegar aos valores, o método Impact 2002+ calculou os impactos das categorias *midpoint*, correlacionadas com as respectivas categorias *endpoint*. Essa correlação foi comentada no Quadro 8.

Quando verificados os impactos *endpoint* mais relevantes entre os processos de produção do vidro LBRO, os danos à Saúde humana (total) são os mais expressivos (1,04E-05 mPt a 0,4 mPt). Na categoria Saúde humana (total), são computados os impactos gerados nas categorias *midpoint*: toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação iônica, depreciação da camada de ozônio e oxidação fotoquímica, e posteriormente normalizados.

Nos resultados, a categoria à Saúde humana (total) teve seus impactos em ordem de grandeza, superior à categoria de Recursos (total) (7,23E-06 mPt a 0,28mPt), a Mudanças climáticas (total) (6,43E-06 mPt a 0,26 mPt), e aos danos referentes à Qualidade do ecossistema (total) (2,27E-06 mPt a 0,09 mPt).

Uma possível explicação para o resultado ter como destaque a categoria à Saúde humana (total), está nos fluxos de entrada e saída dos processos de produção do vidro LBRO, principalmente nas atividades que adotaram o forno, “Vidro (M1), após fusão” e o “Vidro (M1), recozido”, pois para que a seja realizada a fusão e recozimento, foram necessárias horas de consumo de

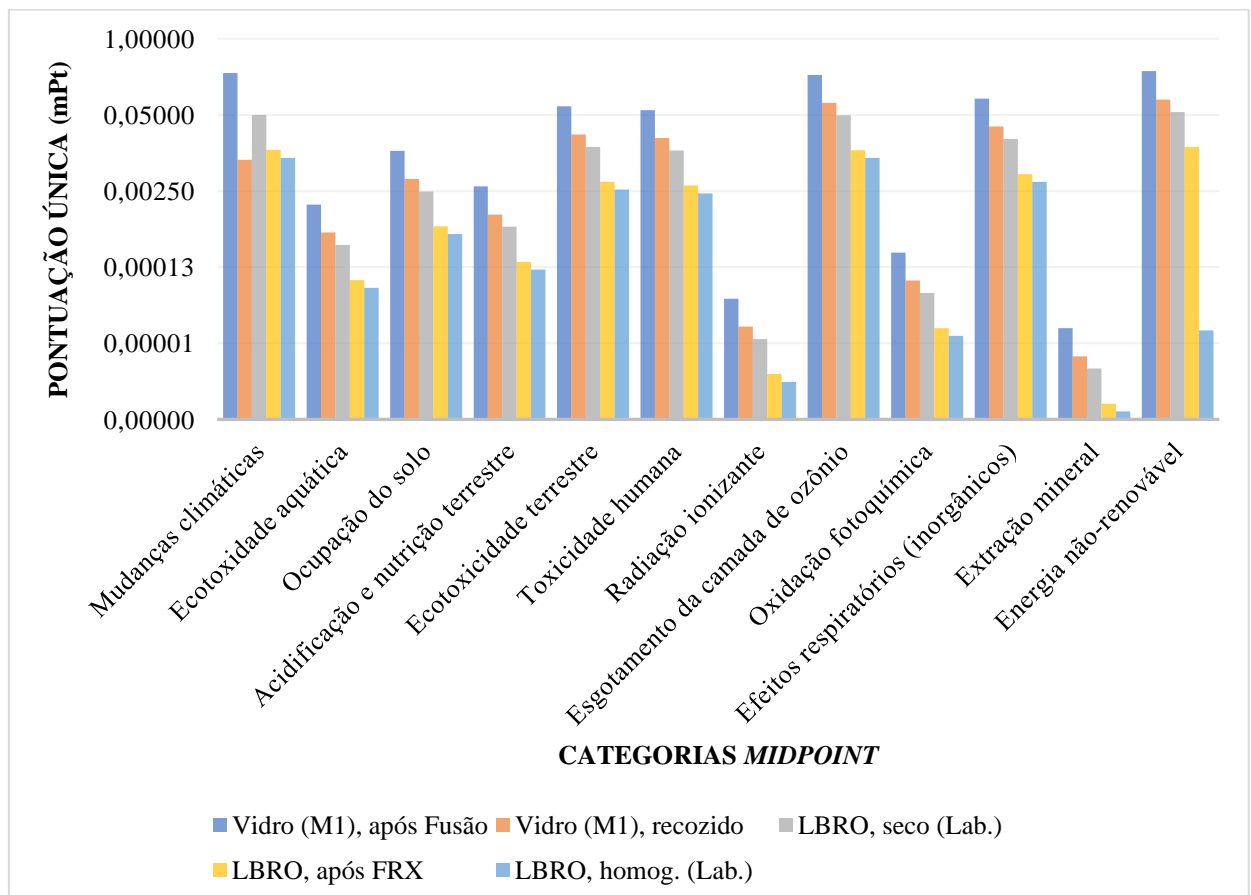
energia e o material tem sua massa reduzida por conta das emissões no ar (CO₂), acarretando então, impactos *midpoint* relacionados à saúde, como a depleção da camada de ozônio.

Além dessas características, outro aspecto, agora relacionado aos Recursos (total), está também relacionado ao consumo de energia, provenientes da fonte de energia não renovável do tipo Fóssil, por parte de produtos derivados de petróleo, e acarretando no esgotamento de recursos, extrações minerais, conseqüentemente, no aquecimento global, provocando mudanças climáticas e afetando então a qualidade do nosso ecossistema.

Com finalidade do melhor entendimento, no Gráfico 7, foram apresentados os resultados normalizados em pontuação única (Pt) dos cinco principais processos da produção do vidro em laboratório, em categorias *midpoint*, essas que foram correlacionadas, o que resultou a Tabela 6.

A fim de verificar estatisticamente se as diferenças significativas dos resultados do Gráfico 7, foi aplicada a análise estatística, ANOVA: fator único, com nível de teste alpha de 5%. A Tabela 7 traz os o resumo dessa análise e na Tabela 8, os resultados da ANOVA.

Gráfico 7 – Resultados do Método Impact 2002+ dos Processos da Produção do Vidro LBRO em Laboratório – Categoria Midpoint (Normalizado)



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Tabela 7 – Resumo: Anova: fator único dos resultados do Gráfico 7

Categorias Midpoint	Contagem	Soma	Média	Variância
Mudanças climáticas	5	0.34039704	0.068079408	0.011809496
Ecotoxicidade aquática	5	0.002375702	0.00047514	3.34389E-07
Ocupação do solo	5	0.019681027	0.003936205	2.29693E-05
Acidificação e nutrição terrestre	5	0.004875324	0.000975065	1.41246E-06
Ecotoxicidade terrestre	5	0.1133785	0.0226757	0.000762013
Toxicidade humana	5	0.09812221	0.019624442	0.000570315
Radiação ionizante	5	5.85788E-05	1.17158E-05	2.0328E-10
Esgotamento da camada de ozônio	5	0.39176521	0.078353042	0.009024462
Oxidação fotoquímica	5	0.000359402	7.18805E-05	7.66338E-09
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	5	0.1537431	0.03074862	0.00140094
Extração mineral	5	1.83732E-05	3.67465E-06	2.00352E-11
Energia não-renovável	5	0.442078126	0.088415625	0.012769835

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Tabela 8 – ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre categorias	0.061347	11	0.005577	1.840498	0.072832	1.99458
Dentro das categorias	0.145447	48	0.00303			
Total	0.206794	59				

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Ao analisar, o valor de F é menor que o valor de F crítico, podemos constatar através do teste ANOVA – fator único que não existe diferença significativa entre os valores das categorias de impactos *midpoint* e o valor-P foi superior aos 5%, comprovando que não existe diferença significativa. No entanto, também foi adotada a análise de estatística através do programa Past4.03, onde foi realizada novamente a ANOVA, no entanto, analisando o resultado do Teste Tukey, onde resultou nos mesmos resultados, ou seja, nenhum resultado foi significativo.

Na avaliação pelo método IPCC 2013, foram analisados os processos com maior potencial de mudança de temperatura global (GTP100) e de aquecimento global (GWP100), para 100 anos. Os resultados foram os mesmos dos demais métodos, no caso, o processo “Vidro (M1), após Fusão” teve com estimativa média de impacto quanto as emissões com 2,78 kg CO₂ eq, o processo “Vidro (M1), recozido”, 0,91 kg CO₂ eq e o terceiro processo com maior valor de emissões é o “LBRO, seco (Lab.)” com 0,53 kg CO₂ eq.

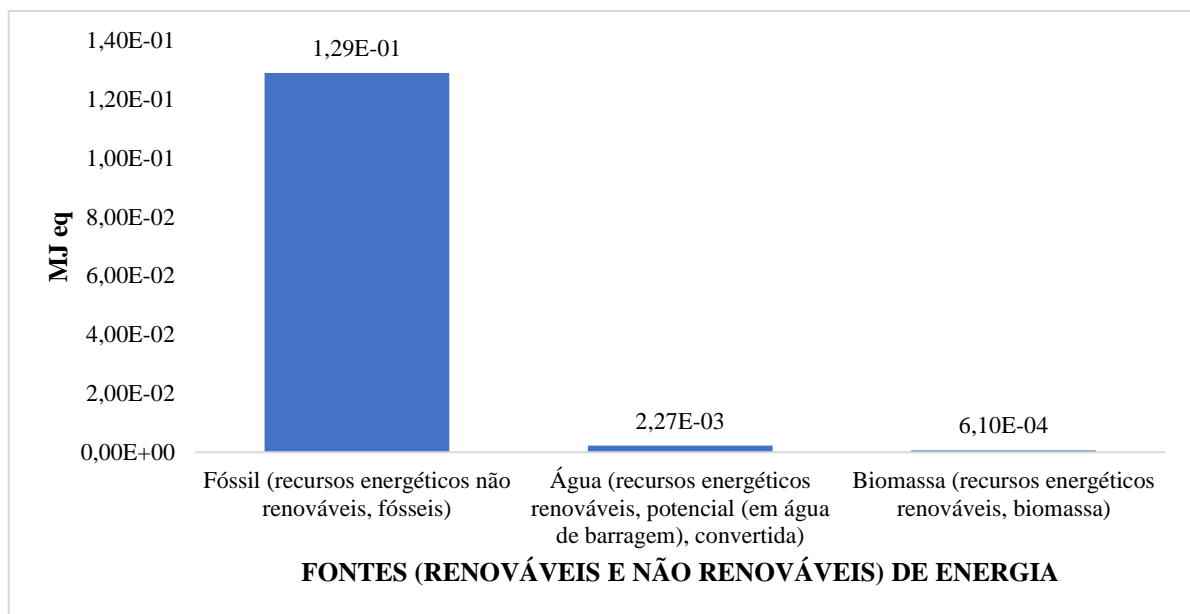
Portanto, ao observar os resultados dos impactos ambientais dos processos de produção do vidro LBRO, são diretamente proporcionais ao consumo de energia elétrica. Para reduzir esses números, sugere-se investigar equipamentos com melhor eficiência energética e adoção de outras fontes de energia renovável, como a solar.

4.2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DA LBRO

Qualquer sistema produtivo está sujeito a gerar impactos ambientais, assim, efetuou-se a avaliação, também dos processos dentro da AAMOL, onde foram contemplados os processos para a preparação e tratamento dos resíduos para o uso como material substituto da sílica.

Analisando o Gráfico 8, que traz os resultados dos impactos ambientais do método CED, de acordo com as fontes de energia, o indicador Fóssil teve valores mais expressivos, quando comparado com as demais fontes. Essa relevância, está de acordo com a fonte energética para consumo final do ES para o segmento de transporte, que são os produtos à base do petróleo (óleo diesel e gasolina), adotado em praticamente todo transporte realizado por caminhões e de outros maquinários como trator. Os demais indicadores, água e a biomassa, estão atreladas ao consumo de energia dos equipamentos, como o filtro prensa.

Gráfico 8 – Resultados dos Impactos Ambientais do Método CED por Fonte de Energia para a Preparação e Tratamento da LBRO

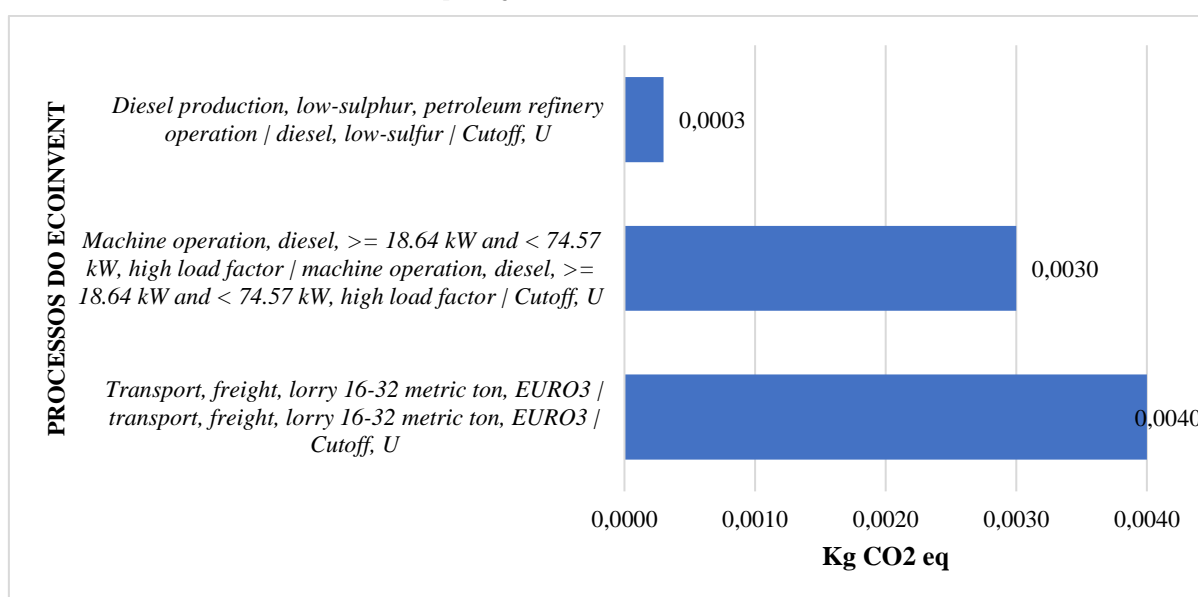


Fonte: Elaboração própria, 2022.

Fazendo uma correlação dos processos adotados no banco Ecoinvent para a montagem dos processos da etapa de tratamento da LBRO, tanto quanto na análise anterior, no método IPCC 2013, conforme estabelecido no Gráfico 9, os principais processos causadores de impactos ambientais foram: Transporte, frete, caminhão de 16-32 toneladas (*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3*); Operação da máquina, diesel, $\geq 18,64$ kW e $< 74,57$ kW, alto fator de carga | operação da máquina, diesel, $\geq 18,64$ kW e $< 74,57$ kW, alto fator de carga (*Machine operation, diesel, ≥ 18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor | machine operation, diesel, \geq*

18.64 kW and < 74.57 kW, high load factor / Cutoff, U); Produção de diesel, baixo teor de enxofre, operação de refinaria de petróleo | diesel, baixo teor de enxofre (*Diesel production, low-sulphur, petroleum refinery operation / diesel, low-sulfur / Cutoff, U*). Porquanto, esses são os processos do banco de dados adotado, mas que foram inseridos na montagem dos processos da LBRO dentro da AAMOL, como: “Trator com plaina niveladora”; transporte interno dentro da central de tratamento e para o transporte da LBRO, seco (ar livre) para o local que foi produzido o vidro.

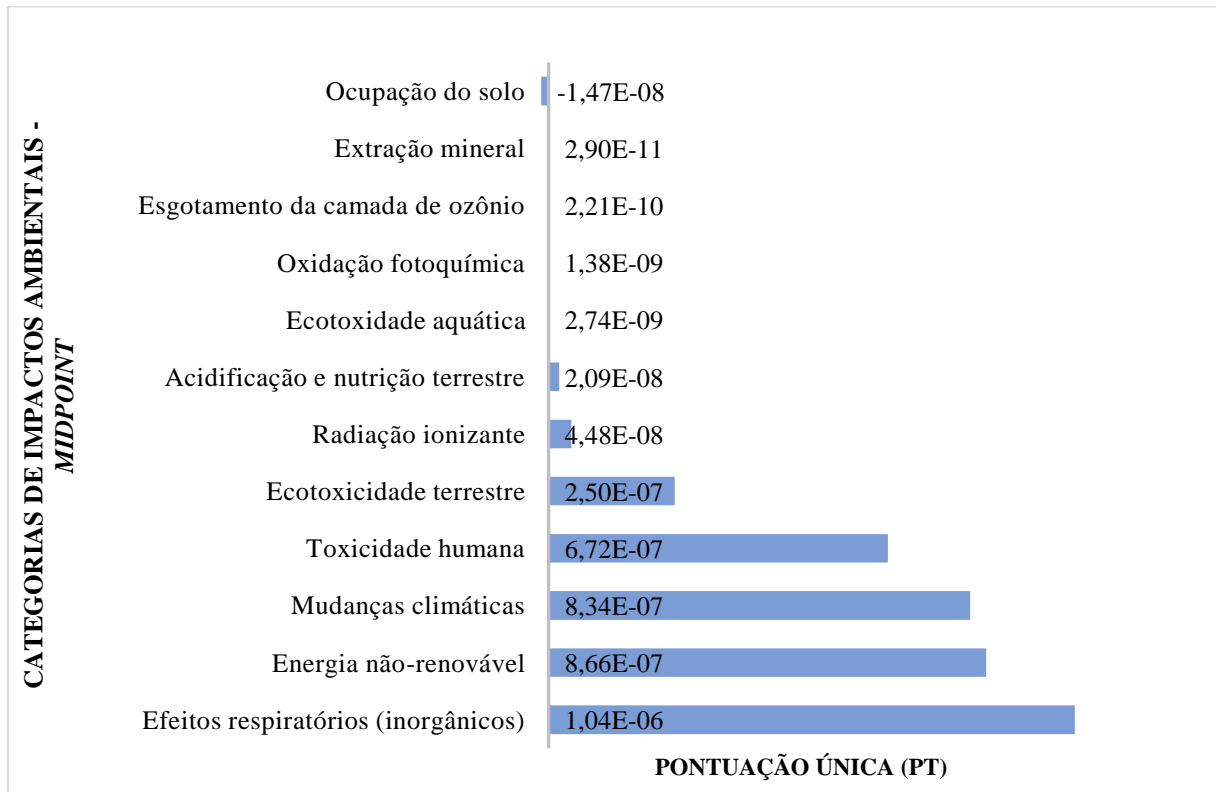
Gráfico 9 – Resultado dos Impactos Ambientais do Método IPCC 2013 por Fonte de Energia para a Preparação e Tratamento da LBRO



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Aferindo os impactos ambientais de pontos médios, conforme metodologia do Impact 2002+ e que foram apresentados no Gráfico 10, é possível perceber que os resultados corroboram com os demais resultados dos métodos anteriores. Na etapa de tratamento da LBRO, a categoria saúde humana foi a que gerou o maior impacto, tendo o indicador Efeitos respiratórios (inorgânicos), essas relacionadas à emissão no ar referente às cinzas, enxofre e óxidos de nitrogênio, como a mais expressiva, seguida das categorias recursos (Energia não-renovável), mudança climática e qualidade do ecossistema. As causas principais estão relacionadas ao transporte, visto que, os caminhões demandam do recurso combustível de combustíveis e consequentemente emitem CO₂ através do escapamento, material particulado, além dos resíduos gerados pelos desgastes dos pneus e freios dentro da central de tratamento.

Gráfico 10 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – método Impact 2002+



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Para reduzir os impactos gerados no tratamento da LBRO, por conta da alta demanda por energia e combustível, seria interessante verificar a possibilidade de investimento em fontes de energias renováveis, como a energia solar, a adoção de caminhões de maior capacidade, como os caminhões com capacidade de 80t (rígidos de 40t e com semirreboque também de 40t), ou caminhões que foram projetados com eficiência energética, reduzindo custos, mais econômicos e, conseqüentemente, reduzem as emissões de GEE.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE QUANTO ÀS DISTÂNCIAS DE TRANSPORTE

O Espírito Santo, possui relevância no mercado de Rochas Ornamentais, segmento esse presente em diversos municípios do estado. Por consequência dessa produção, os resíduos são gerados e precisarão de uma destinação e/ou tratamento para ser utilizado como fonte de substituição de um insumo convencional, no caso desta pesquisa, a LBRO seca em substituição da areia industrial (sílica). Como foi demonstrada no tópico anterior.

No software de ACV, foi criado um parâmetro de transporte da LBRO tratada partindo de cidades distintas conforme Tabela 4, além das informações dos demais materiais necessários para a produção do vidro. Considerou-se para Análise de Sensibilidade de transportes os três métodos AICV adotados nas análises anteriores.

Definiu-se que, para a comparação da LBRO transportadas de diferentes CT, em relação a areia industrial (sílica), que fosse removido do cálculo de impacto, o transporte da sílica até o destino (Cachoeiro de Itapemirim/ES), considerando apenas as informações de entrada e saída dos processos para a obtenção da mesma. Fomentando assim, a motivação em adotar a LBRO ao invés do material convencional. Essa análise comumente adotada por pesquisadores ao realizar ACV de substituição de insumos convencionais por insumos reciclados (MARINKOVIĆ et al., 2010; ROSADO et al., 2017; ZULCÃO, 2018).

4.3.1 Aquecimento global (kg CO₂ eq., método IPCC 2013)

O resultado foi como o esperado, quanto maior a distância do transporte da LBRO para o local que será fabricado o vidro, maior é o impacto, no entanto, fazendo uma comparação entre as distâncias das centrais de tratamento de Nova Venécia/ES, com a de São Domingos do Norte/ES (as mais distantes do local de destino), mesmo tendo uma diferença 20% em relação à distância (km), a diferença do impacto ambiental (kg CO₂ eq) foi de 11%. Neste método de AICV, os impactos ambientais provenientes da LBRO foram maiores que o produto convencional em todas as cidades, com exceção da LBRO tratada e transportada de Cachoeiro de Itapemirim/ES, que apresentou uma diferença de aproximadamente 21% de impacto em relação a areia industrial (sílica).

Conforme a estimativa do impacto aquecimento global (kg CO₂ eq), pelo método IPCC 2013 e inseridos na Tabela 9, torna-se mais vantajoso (avaliando apenas por impacto gerado) tratar e transportar a LBRO até o Centro Universitário São Camilo, do que adotar a areia industrial sílica (analisados apenas os impactos do beneficiamento).

Tabela 9 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) - método IPCC 2013

Material/Origem do Transporte	kg CO₂ eq
LBRO_CT_Nova Venécia	1,59E-01
LBRO_CT_São Domingos do Norte	1,44E-01
LBRO_CT_Serra	8,35E-02
Areia Industrial (Sílica)	4,10E-02
LBRO_CT_Cachoeiro de Itapemirim	3,40E-02

Fonte: Elaboração própria, 2022.

A fim de verificar se existe diferença significativa estatisticamente do impacto gerado com base na distância de cada origem do material, aplicou-se o Teste-t, com modo unicaudal para amostras diferentes, com nível de teste alpha de 5%. Os resultados conforme são demonstrados na Tabela 10, apontam que a diferença entre as médias é significativa.

Tabela 10 – Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	Km	kg CO₂ eq
Média	347.6	0.0923
Variância	117454.3	0.003307
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
Gl	4	
Stat t	2.267331218	
P(T<=t) unicaudal	0.042990387	
t crítico unicaudal	2.131846786	
P(T<=t) bicaudal	0.085980775	
t crítico bicaudal	2.776445105	

Fonte: Elaboração própria, 2022.

4.3.2 Energia incorporada (MJ eq, método CED)

Para a categoria de demanda de energia incorporada nos processos para tratamento da LBRO mais o transporte, bem como o impacto ambiental da produção da sílica, os resultados seguiram a mesma ideia da análise anterior. Os resultados foram gerados, adotando o mesmo padrão de tratamento da LBRO em todas as centrais de tratamento, tendo como diferencial a distância (km) até o destino.

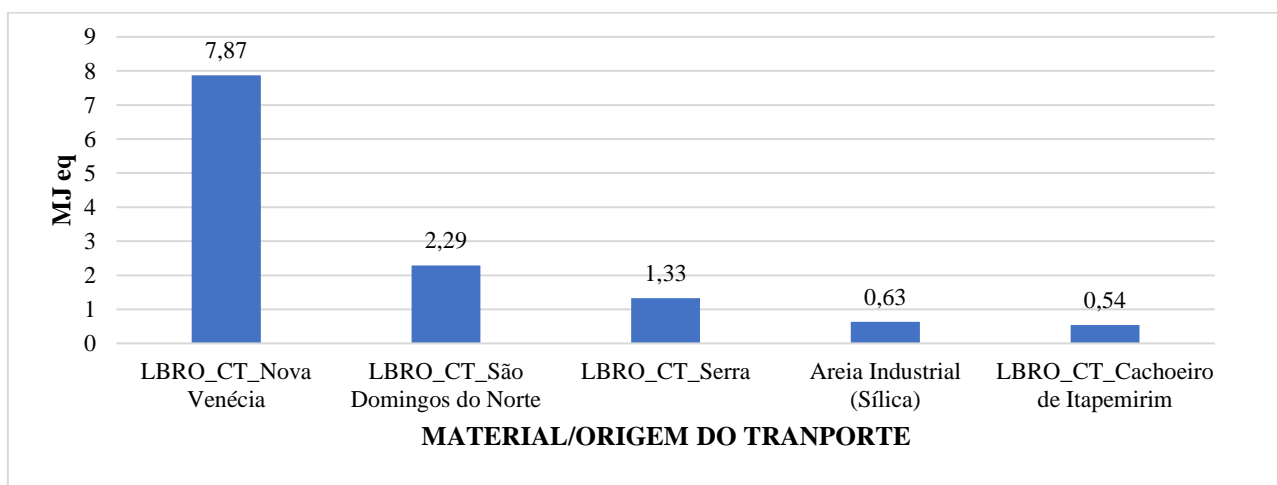
A areia industrial (sílica) apresentou, aproximadamente 17%, um nível de impacto maior que a LBRO tratada e transportada de Cachoeiro de Itapemirim/ES, mesmo não considerando para a simulação os processos de transporte da sílica até o destino final, ou seja, mais uma vez a LBRO de Cachoeiro de Itapemirim/ES teve menor intensidade e sendo uma opção mais viável em níveis de impactos ambientais. O que é compreensível pela diferença dos tamanhos (m²) das plantas e capacidade de beneficiamento.

Nota-se que a intensidade do impacto está alinhada com a distância (km) necessária para transportar a LBRO das centrais de tratamento até o destino final. Dessa forma, a localização das CT em ordem de maior impacto são: Nova Venécia/ES (779 km – 7,87 MJ eq), São Domingos do Norte (685 km – 2,29 MJ eq), Serra (324 km – 1,33 MJ eq) e Cachoeiro de Itapemirim (28 km – 0,54 MJ eq). A Areia industrial (sílica) teve sua distância zerada e o impacto foi de 0,63 MJ eq.

Analisando as duas origens de LBRO, que geraram mais impactos, no caso, a de Nova Venécia/ES e a de São Domingos do Norte/ES. Mesmo a central de tratamento de Nova Venécia/ES tendo uma diferença de 124 km, o que representa aproximadamente 20% em relação ao CT de São Domingos do Norte/ES, a diferença dos impactos foi aproximadamente de 244%.

No Gráfico 11 são apresentados os resultados da Análise de Sensibilidade do método CED.

Gráfico 11 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – método CED

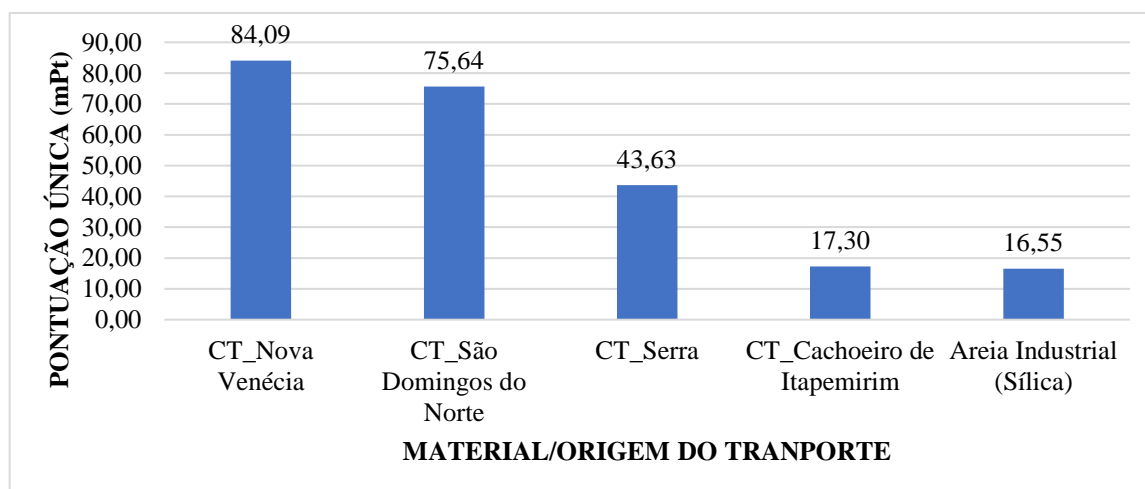


Fonte: Elaboração própria, 2022.

4.3.3 Impacto total (mPt, método Impact 2002+)

Para o método Impact 2002+, o aumento da distância (em km) foi diretamente proporcional ao impacto ambiental gerado, ou seja, quanto maior a distância do local de origem da LBRO até o local de destino, maior foi o impacto ambiental e que foram dispostos no Gráfico 12. De maneira geral, neste método, a areia industrial gerou menos impacto que qualquer município origem da LBRO tratada e transportada. Quando verificada a diferença da areia industrial (sílica) com a LBRO da central de tratamento de Cachoeiro de Itapemirim (a que gerou menos impacto entre as demais cidades, por conta da menor distância até o destino), existe uma diferença de aproximadamente 5%.

Gráfico 12 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o laboratório e da Areia Industrial (sílica) – Impact 2002+



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Na Tabela 11, podem ser visualizados os resultados individuais de cada variante de projeto, além do impacto total geral, ou seja, a distância da LBRO tratada e transportada proveniente de cada CT e da sílica em diferentes categorias de impactos que o método propõe, apresentados na unidade pontuação única (mPt), ou *single score*. Ressaltando, que a categoria de impacto que teve uma maior estimativa foi a de saúde humana, atrelada as emissões GEE por conta do uso do transporte interno e externo de caminhões e quanto ao uso do diesel adotados nos processos inseridos na montagem de cada processo da central de tratamento e da areia industrial (sílica) ao utilizar de recurso água e solo, consumo de energia e combustível, extração mineral da natureza.

Tabela 11 – Resultado da Análise de Sensibilidade da LBRO Transportada de Diferentes Centrais de Tratamento até o Laboratório e da Areia Industrial (sílica) - Diferentes Categorias – Impact 2002+

Categoria de Impacto	Unidade	LBRO_ CT_Nova Venécia	LBRO_ CT_São Domingos do Norte	LBRO_ CT_Serra	LBRO_ CT_Cachoeiro de Itapemirim	Areia Industrial (Sílica)
Saúde humana (total)	mPt	43,86	39,48	22,7	8,88	7,4
Recursos (total)	mPt	16,6	14,9	8,67	3,52	4,25
Mudanças climáticas (total)	mPt	15,64	14,1	8,16	3,33	3,85
Qualidade do ecossistema (total)	mPt	7,99	7,16	4,1	1,57	1,05
Impacto Total	mPt	84,09	75,64	43,63	17,30	16,55

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Fazendo uma comparação entre a LBRO produzida em Cachoeiro de Itapemirim/ES (AAMOL) com a areia industrial (sílica), os resultados sofreram variações. Nas categorias de saúde humana e qualidade do ecossistema, a sílica leva vantagem, e nas categorias recursos e mudanças climáticas, a LBRO é menos impactante que o produto convencional.

Portanto, em relação ao método Impact 2002+, os resultados demonstraram que o produto convencional é mais atraente, no entanto, vale lembrar que torna-se interessante a instalação de indústria base de vidro, nas proximidades da central de tratamento, bem como, a adoção de fonte de energia renovável, como a solar, pois dessa forma poderão minimizar os impactos ambientais das CT e tornar a LBRO um produto não apenas potencial, mas uma solução para substituir a areia industrial (sílica), visto que, a mesma já foi comprovada tecnicamente por Bastos (2018).

4.3.4 Análise de sensibilidade do transporte da LBRO tratada em Cachoeiro de Itapemirim/ES até a indústria de vidro em Jacutinga/MG

Para esta questão, foi verificada se seria interessante a fábrica de vidro instalada em Jacutinga/MG adotar a LBRO tratada e transportada de Cachoeiro de Itapemirim/ES ou adotar

a areia industrial (sílica) de Analândia/SP. Neste caso, diferente da Análise de Sensibilidade anterior, foram inseridos não só o gasto da produção da sílica, mas também as informações do transporte até o local de destino, assim como a da LBRO.

Levando em consideração apenas a distância (KM) da ida, foi realizada a média de percursos possíveis até o endereço de Jacutinga/MG, sendo que o transporte da LBRO ficou maior em 706 KM, o que influenciou os resultados, o que trouxe como análise a não vantajosidade de tratar e transportar a LBRO até a fábrica de vidro mais próxima do Espírito Santo, o que reforça a necessidade de que para adotar a LBRO, a fábrica deve estar nas mesmas proximidades, não compensando a sua adoção, devido todo o impacto ambiental atrelado pelo transporte rodoviário e consumo de combustível.

Na Tabela 12 podem ser visualizados os resultados dos três métodos de AICV que o estudo propõe e que nessa estimativa de impacto ambiental, a areia industrial (sílica) é menos agressiva ao meio ambiente do que a LBRO.

Tabela 12 – Resultado da Análise de Sensibilidade dos Impactos Ambientais do Tratamento e do Transporte da LBRO e do Beneficiamento e Transporte da Areia Industrial (Sílica) até a Fábrica de Vidro em Jacutinga/MG

Material	CED (MJ, eq)	IPCC 2013 (kg CO₂ eq)	Impact 2002+ (mPt)
Areia Industrial (Sílica)	1,31	0,13	31,32
LBRO_CT_Cachoeiro de Itapemirim	2,68	0,33	87,94

Fonte: Elaboração própria, 2022.

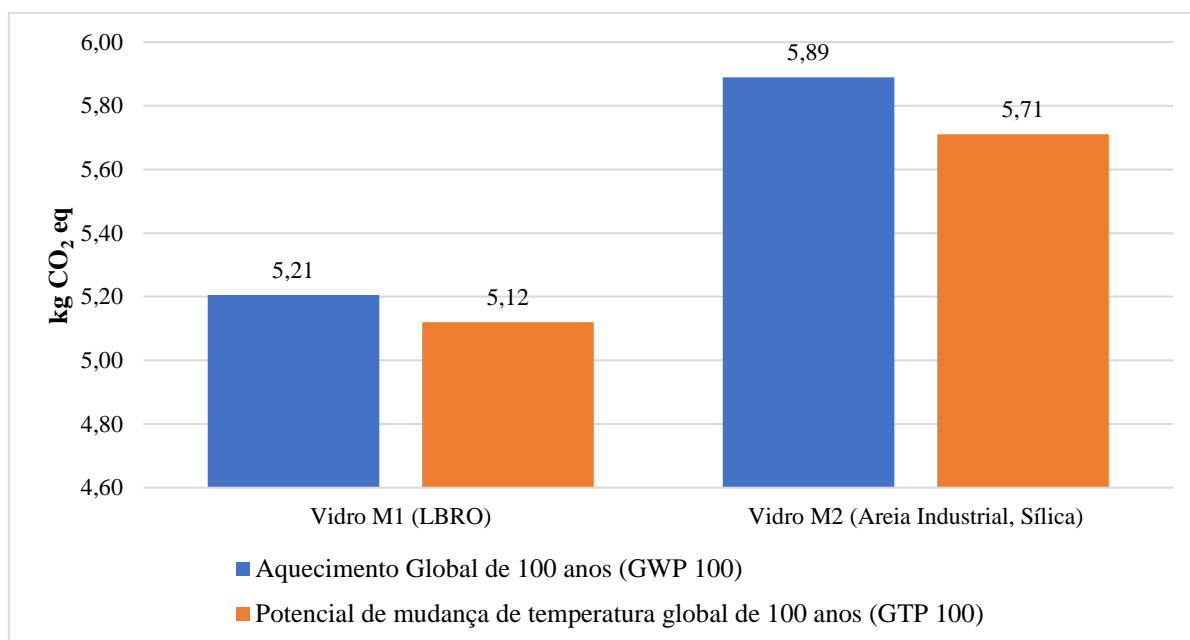
4.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO CICLO DE VIDA DO VIDRO M1 (LBRO) E M2 (AREIA INDUSTRIAL (SÍLICA))

Após a montagem de todos os processos da LBRO, da areia industrial (sílica) e dos processos de produção do vidro, realizados no laboratório do Centro Universitário São Camilo no programa OpenLCA, comparou-se o vidro sodo-cálcico M1 (LBRO) com o vidro sodo-cálcico M2 (areia industrial, sílica). Nesta análise comparativa, foram contabilizados também os transportes dos carbonatos e demais materiais utilizados para produção do vidro.

Inicialmente, foram comparados os resultados dos vidros através do método IPCC 2013, onde avaliou todos os processos que por ventura estão ligados aos impactos ambientais referentes às categorias Aquecimento Global e de Potencial de Mudanças Climáticas em kg CO₂ eq e que podem ser visualizados no Gráfico 13. De modo geral, o vidro M1 (LBRO) teve menor impacto ambiental em relação ao vidro M2 (areia industrial, sílica), a diferença ficou em

aproximadamente 13% para a categoria aquecimento global e próximo de 12% na categoria mudanças climáticas.

Gráfico 13 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – IPCC 2013



Fonte: Elaboração própria, 2022.

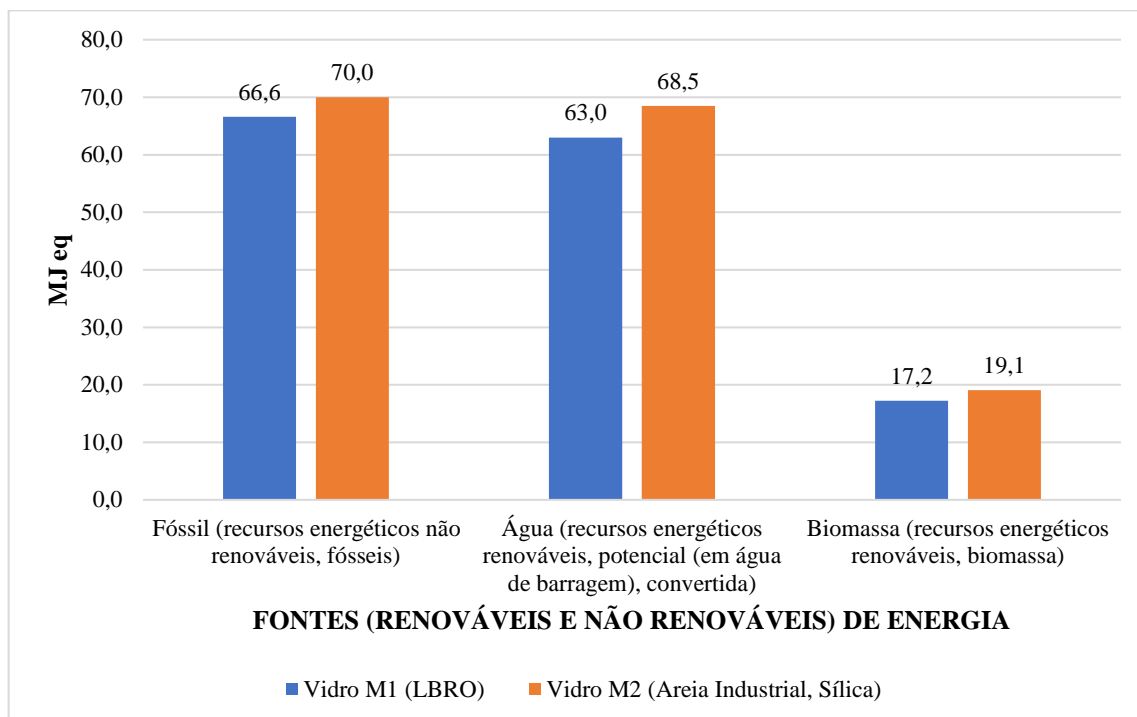
Ao realizar a análise estatística do Teste-t, onde foi encontrado para a variável P-valor, um resultado inferior ao parâmetro alpha de 5% e que pelo modo bicaudal, mostra que a diferença entre as médias é significativa.

Analisando os processos, o consumo de energia elétrica foi o principal causador, mostrando-se a mesma tendência, tendo o forno de fusão usado em laboratório e o filtro prensa na AAMOL os principais processos que geraram impactos. Dessa forma, recomenda-se o uso desses equipamentos apenas com a sua máxima capacidade de processamento.

No entanto, também contribuem para o aquecimento global e para as mudanças climáticas, o uso e ocupação do solo, transporte interno e extração da matéria-prima pela empresa de beneficiamento de areia industrial (sílica), bem como as atividades de transporte e disposição da LBRO no pátio para a secagem na central de tratamento (AAMOL).

Na segunda análise simulada, foi gerada pelo método CED, a fim de levantar a demanda de energia consumida em diferentes fontes (renováveis e não renováveis). No Gráfico 14 são demonstradas as três principais fontes de energia com os seus resultados em MJ eq, tanto do Vidro M1 (LBRO), quanto do Vidro M2 (areia industrial, sílica).

Gráfico 14 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – Método CED por Fonte de Energia



Fonte: Elaboração própria, 2022.

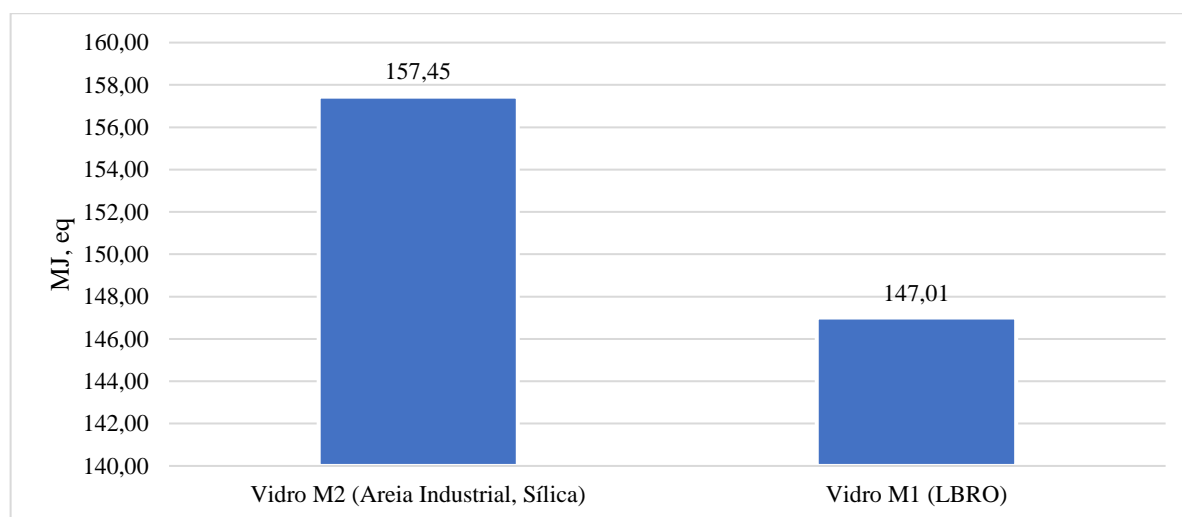
Após comparação dos impactos observados entre os diferentes vidros, o Vidro M2 (areia industrial, sílica) apresenta impacto maior nas fontes fóssil, água e biomassa, sendo superior, respectivamente, em 5%, 9% e 11%. Então, apesar dos processos em laboratório para produção do vidro demandar exclusivamente de energia, que na grande maioria proveniente das hidrelétricas, a fonte fóssil foi superior por conta do alto impacto causado pelos processos de transporte e o consumo de diesel.

Mediante ao que foi dito anteriormente, recomenda-se projetar a adoção de outras fontes de energia renovável, como a própria biomassa, a solar e a eólica e que são fomentadas no Plano Nacional de Energia – PNE 2050, como medida de eficiência energética, mas também em prol de uma inovação tecnológica e competitividade econômica (MME, 2020).

Assim, é necessária a realização de nova simulação, adotada em substituição de outra, ressaltando, que para que as estimativas de impactos em prol da sustentabilidade tenham mais precisão, são necessárias além da avaliação dos impactos ambientais, a realização das avaliações de impactos quanto ao âmbito social e de custo financeiro. Não basta apenas ser ambientalmente melhor, mas ainda economicamente viável e que traga o desenvolvimento social no ciclo de vida.

De modo geral, como demonstrado no Gráfico 15, o resultado do método CED quando comparadas a diferenças do Vidro M2 (areia industrial, sílica) em relação ao Vidro M1 (LBRO), apresentou uma diferença de 7%. Sendo assim, novamente o vidro contendo o resíduo de rochas ornamentais demonstrou sua adoção mais vantajosa ambientalmente.

Gráfico 15 – Resultados da ACV do Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – Método CED



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Ao simular a avaliação do ciclo de vida pelo método Impact 2002+, objetivou-se identificar os impactos ambientais de categorias *midpoint*, dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados dos Impactos Midpoint da Comparação entre Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – método Impact 2002+ (normalizados)

Categoria de Impacto	Unidade	Vidro M1 (LBRO)	Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica)
Mudanças climáticas (mudanças climáticas)	mPt	4,63E-01	4,77E-01
Qualidade do ecossistema (ecotoxicidade aquática)	mPt	2,57E-03	2,66E-03
Qualidade do ecossistema (ocupação do solo)	mPt	1,97E-02	2,17E-02
Qualidade do ecossistema (acidificação terrestre e nutrição)	mPt	5,72E-03	6,04E-03
Qualidade do ecossistema (ecotoxicidade terrestre)	mPt	1,24E-01	1,32E-01
Saúde humana (toxicidade humana)	mPt	1,71E-01	1,69E-01
Saúde humana (radiação ionizante)	mPt	1,23E-01	1,38E-01
Saúde humana (esgotamento da camada de ozônio)	mPt	6,53E-05	6,97E-05
Saúde humana (oxidação fotoquímica)	mPt	4,03E-04	4,34E-04
Saúde humana (efeitos respiratórios (inorgânicos))	mPt	4,59E-01	4,68E-01
Recursos (extração mineral)	mPt	2,82E-05	2,20E-05
Recursos (energia não renovável)	mPt	4,92E-01	5,11E-01

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Foi realizada a análise estatística do Teste-t, com as amostras de resultados da Tabela 13, presumindo variâncias diferentes a nível de 5% de significância, conforme pode ser verificado na Tabela 14.

Tabela 14 – Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

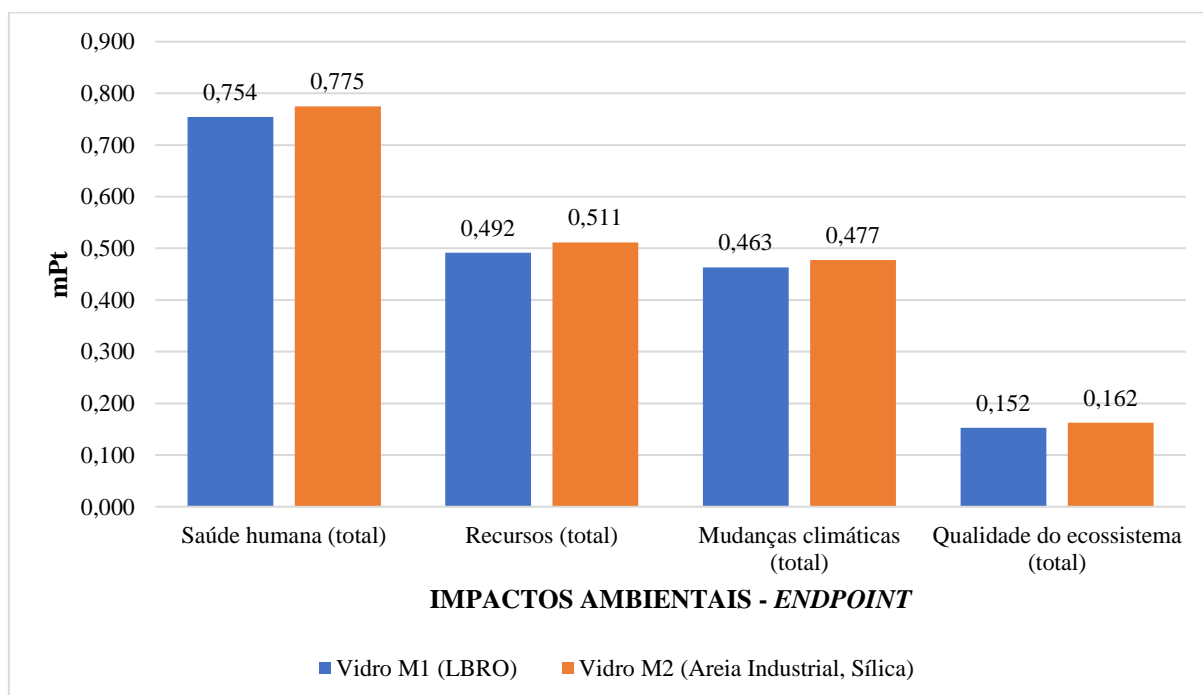
	Vidro M1 (LBRO)	Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica)
Média	0.155125173	0.160526672
Variância	0.039898419	0.042228069
Observações	12	12
Hipótese da diferença de média	0	
gl	22	
Stat t	-0.065292496	
P(T<=t) unicaudal	0.474265403	
t crítico unicaudal	1.717144374	
P(T<=t) bicaudal	0.948530805	
t crítico bicaudal	2.073873068	

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Avaliando o resultado da análise estatística do Teste-t adotando o modo bicaudal e o tipo de amostras diferentes, não há diferenças significativas entre as médias dos resultados do Vidro M1 (LBRO) e o Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica).

A fim de facilitar na comparação dos impactos, gerou-se também os resultados normalizados das categorias *endpoint*, expostos no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Resultados dos Impactos Endpoint da Comparação entre Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica) – método Impact 2002+ (normalizados)



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Vale lembrar, como aspecto negativo para o Vidro M1 (LBRO), por exemplo, que nas categorias *midpoint*, Saúde humana (toxicidade humana) e Recursos (extração mineral), o impacto gerado pelo Vidro M1 (LBRO) foi superior ao vidro tradicional. Isso se deve ao fato do dispêndio de energia pelo filtro presa adotado para o tratamento da LBRO e da RQ, da ocupação de terra e do deslocamento por caminhões dos resíduos para a secagem e pelas partículas emitidas durante a combustão dos combustíveis fósseis.

Igualmente como os demais métodos aplicados na simulação, a produção do Vidro M1 (LBRO) gerou uma menor estimativa de impacto. Portanto, o Vidro M2 (areia industrial, sílica) provocou um aumento de impacto nas quatro categorias (*endpoint*) de danos ambientais: Saúde Humana, Recursos, Mudanças Climáticas e Qualidade do Ecossistema, respectivamente em 3%, 4%, 3% e 7%.

Na Tabela 15, podem ser visualizados os impactos ambientais nos três métodos e a variação do aumento entre o Vidro M2 (areia industrial, sílica) e o Vidro M1 (LBRO).

Tabela 15 – Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Métodos	Vidro M1 (LBRO)	Vidro M2 (areia industrial, sílica)	% de redução de impacto
CED (MJ eq)	147,01	157,45	7,1
IPCC 2013 (Kg CO ₂ eq)	5,16	5,80	12,4
Impact 2002+ (mPt)	2,00	2,37	18,5

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Contribuições de cada processo influenciados nos vidros produzidos, estão dispostos no Apêndice D.

5 CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados das comparações, é possível dizer que o Vidro M1 (LBRO) é mais atrativo que o vidro convencional, pois demandou 7,1% a menos de energia, reduziu em 12,4% as emissões de CO₂ eq, e em relação ao impacto total, o valor de redução foi 18,5%.

Justifica o uso da LBRO, pois além de resolver o problema de destinação, o resíduo vem sendo pesquisado como decorrido nesta dissertação, como agregado para outros materiais da construção civil, como para produção de concreto, material utilizado para fabricação de vários artefatos e adotado em larga escala, por exemplo, para blocos de vedação, além do vidro sodo-cálcico e borossilicatos.

Na avaliação, como um todo, o consumo de energia dos processos de fusão e recozimento dos materiais, além do meio de transporte utilizado, são os grandes responsáveis pelos impactos ambientais. Quanto a diferença nos valores dos dois vidros, está no dispêndio de energia e os impactos que cada fonte gera (gás natural e hidráulica), pela ocupação de solo da planta industrial, extração da areia, uso de água e transporte interno para o beneficiamento de areia industrial (sílica).

Em relação à primeira Análise de Sensibilidade, o transporte da LBRO originadas das cidades de Cachoeiro de Itapemirim, Serra, São Domingos do Norte e Nova Venécia do estado do Espírito Santo até o seu destino (local onde foi produzido o vidro) Centro Universitário São Camilo, localizado no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES, em todas as origens, exceto de Cachoeiro de Itapemirim/ES, devido ao impacto ambiental, não compensou o transporte até o local que foi produzido o vidro.

Já a segunda Análise de Sensibilidade, o transporte da LBRO de Cachoeiro de Itapemirim/ES até a fábrica mais próxima do Espírito Santo, localizada em Jacutinga/MG, o material convencional, areia industrial sílica, teve o melhor desempenho.

O estado do Espírito Santo, como foi discutido, tem relevância no mercado e na produção de rochas ornamentais. Com os resultados da dissertação, foram comprovadas que é viável de forma ambiental, através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, produzir vidro sodo-cálcico adotando a Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais. Portanto, sabendo que esse segmento industrial pode gerar em sua cadeia produtiva (lavra e beneficiamento) resíduos, na ordem de 83%. Fica evidente, diante desse quadro, que o ES tem potencial para a instalação de uma fábrica de vidro, no entanto, são necessários outras análises para avaliar de forma mais precisa essa afirmação.

Ao país, portanto, resta a criação e a manutenção de métodos nacionais de AICV, para suprir essa limitação dentro da aplicação da metodologia ACV, trazendo então, resultados de impactos mais próximas da realidade brasileira.

Outra limitação é quanto aos inventários, apesar do banco de dados já incluir diversos processos brasileiros, são necessárias diversas adaptações de dados internacionais para o contexto brasileiro antes da sua adoção, tais como: o processo de extração de determinados agregados, possíveis combustíveis utilizados no aquecimento de fornos, estimativas de perdas, índices de reciclagem de materiais, e o uso alternativo de outros materiais na falta do material brasileiro.

É preciso ressaltar que, os processos de produção do vidro em laboratório, em relação aos processos convencionais de uma indústria, sofrem variações por diferença em sua escala de produção, podendo trazer novos resultados e interpretações. Não foram consideradas na elaboração do ICV, as embalagens para cada material, portanto, esse impacto não foi contabilizado. Ademais, as formas para tratar o resíduo pode variar por empresa. Nesta pesquisa adotou-se os mesmos valores levantados na AAMOL.

Finalmente, os resultados desse estudo mostraram que a incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais minimiza positivamente os impactos ambientais para produção do vidro sodo-cálcico, mostrando-se assim, sua viabilidade ambiental para o cenário analisado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Há possibilidade de implementação, dentro do que se propõe esta dissertação, avaliando ambientalmente o ciclo de vida da produção de vidro sodo-cálcico com a incorporação da LBRO, a abordagem das ferramentas de avaliação social e de custo. Para exemplificar, em relação ao custo benefício em adotar a LBRO ao invés da areia industrial, bem como os impactos sociais quanto as mudanças que uma fábrica traria para a região.

Outra lacuna é quanto à possibilidade da implantação de uma fábrica de vidro no município do ES, no entanto, requer uma avaliação técnica para a disponibilidade de recurso para fabricação de vidro quanto à distância da LBRO até a fábrica, a fim de definir qual o melhor cenário ou município para a instalação da fábrica, em termos da viabilidade ambiental calculada pela ACV.

Também é possível trabalhar sobre a criação do banco de dados para o setor, de forma mais realista, permitindo então avaliar ACV no contexto industrial – para isso, pode ser na indústria de MG para um tipo de produto, levando em consideração a cadeia logística do produto.

Observando as características da empresa. Não apenas de uma condição laboratorial e fornos elétricos.

Durante o processo da pesquisa e análise dos resultados, foram verificadas algumas possíveis abordagens adicionais quanto a utilização da metodologia ACV, conforme a seguir descrito:

- Avaliar os impactos sociais e de custos do ciclo de vida da produção do vidro com LBRO;
- Avaliar tecnicamente a disponibilidade de recurso para fabricação de vidro quanto a distância da LBRO até a fábrica, a fim de definir qual o melhor cenário ou município para a instalação da fábrica, em termos da viabilidade ambiental calculada pela ACV;
- Estudos de inventários dos demais materiais (carbonatos e óxidos) para a produção do vidro;
- Estudos comparativos de inventários dos processos industriais para a produção do vidro;
- Inserir novas fontes de energia renovável nas simulações;
- Ampliação da fronteira do sistema do vidro a base da LBRO, como *cradle-to-cradle*, considerando o cenário de logística reversa dos resíduos do vidro LBRO;
- Avaliar a incorporação da LBRO na produção de vidro borossilicatos;
- Avaliar a incorporação da sílica a base de casca de arroz na produção de vidro sodo-cálcicos;
- Avaliar a incorporação dos resíduos da construção civil na fabricação de vidro sodo-cálcicos.

REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15112: Resíduos de construção e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação**, 2004a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação**, 2004b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15114: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação**, 2004c.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos**, 2004d.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**, 2004e.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 14.040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**, 2009a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 14.044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.**, 2009b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações — Terminologia**, 2013.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO TR 14049: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário**, 2014.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO/TS 14067: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação**, 2015.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR ISO TR 14047: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto**, 2016a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO/TS 14033: Gestão ambiental - Informações ambientais quantitativas - Diretrizes e exemplos**, 2016b.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO/TS 14071: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009**, 2018.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO/TS 14027: Rótulos**

e declarações ambientais - Desenvolvimento de regras de categoria de produto. 2019a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ISO/TS 14072: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional**, 2019b.

ABIROCHAS (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS). **Produção Brasileira de Lavra**. 2021. Disponível em: <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/10/Producao-Brasileira-Lavra-2021.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2021.

ABRAVIDRO (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS). **O mercado vidreiro em números**. 2021. Disponível em: https://abravidro.org.br/wp-content/uploads/2021/05/Panorama_Abravidro_2021_tablet.pdf. Acesso em 17 dez. 2021.

AKERMAN, M. **Introdução ao Vidro e Sua Produção**. Associação Técnica Brasileira das Indústrias de Vidro - ABIVIDRO. Escola do Vidro, 2014.

AL-ZBOON, K.; AL-ZOU'BY, J. Recycling of stone cutting slurry in concrete mixes. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, n. 2, p. 324-335, 2015.

ALEIXO, F. C. et al. Preparation of soda-lime glass using rock wool waste | Preparação de vidros sodo-cálcicos utilizando resíduo de lã de rocha. **Cerâmica**, v. 62, p. 358-364, 2016.

ALVES, K.F.; UGAYA, C. M. L. **Incertezas em AICV: estado da arte.VI Congresso Brasileiro sobre Gestão de Ciclo de Vida**. Brasília-DF, 2018.

ALVES, K. DE F. et al. Water scarcity in Brazil: part 2-uncertainty assessment in regionalized characterization factors. **International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 1-21, 18 mar. 2020.

ALVIM, C. F; MAFRA, O. Efeito Estufa: Uma moratória para o metano. **Economia e Energia**, 2018.

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 192-202, 2017.

ALYOUSEF, R. et al. Experimental Study of New Insulation Lightweight Concrete Block Floor Based on Perlite Aggregate, Natural Sand, and Sand Obtained from Marble Waste. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 8160461, 2019.

AMARAL, L. F. et al. Eco-friendly mortars with addition of ornamental stone waste - A mathematical model approach for granulometric optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, 2020.

ANAVIDRO (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE VIDRAÇARIAS). **Quanto tempo o vidro leva para se decompor?** Disponível em: <https://www.anavidro.com.br/quanto-tempo-o-vidro-leva-para-se-decompor/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

ANDRÉ, A. et al. Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 389–396, 2014.

ANICER, Fernando Duarte. **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto**. 2011. Disponível em: <https://anicerpro.com.br/wp-content/uploads/2018/04/ACV-Analise-do-Ciclo-de-Vida-Telhas-Ceramicas.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.

APPEL, Marthina et al. **Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de uma Malha Têxtil de Algodão**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/202767>. Acesso em: 06 jun. 2021.

ARSP-ES (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO). **Balanco Energético do Estado do Espírito Santo 2020 - Ano Base 2019**. Balanco Energético. 2021. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/GrupodeArquivos/balanco-energetico>. Acesso em: 07 dez. 2021.

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de Vidros Sodo-cálcicos a partir de Resíduos de Rochas Ornamentais**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.

BAEZA, F. et al. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 645-653, 2014.

BALLESTEROS, F. et al. Electroplating sludge handling by solidification/stabilization process: a comprehensive assessment using kaolinite clay, waste latex paint and calcium chloride cement additives. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 6, p. 1505-1517, 2019.

BARBOSA, P. P. **Análise dos impactos ambientais da cadeia têxtil do algodão no espaço urbano-industrial: uma aplicação da avaliação do ciclo de vida**. 2012. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3538>. Acesso em: 5 mar. 2020.

BARROS, M. M. et al. Ecological bricks from dimension stone waste and polyester resin. **Construction and Building Materials**, v. 232, 2020b.

BASTOS, I. A. **Utilização De Resíduos De Rochas Ornamentais Na Fabricação De Vidros Sodo-Cálcicos**. Vitória: Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

BIZI, E. **Proposta Preliminar de uma sistemática auxiliar de tomada nas decisões para recuperação de áreas degradadas por pedreiras próximas a centros urbanos**. Vitória: Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), 2011.

BRANDER, M.; BURRITT, R. L.; CHRIST, K. L. Coupling attributional and consequential

life cycle assessment: A matter of social responsibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 514-521, 2019.

BRANDT, C. T. B. **Sustentabilidade, Produção Lucrativa e Atuação Governamental para uma Economia Verde: Textos para Discussão**. Brasília, 2012. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/242509/TD113-CristinaBrandt.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 4 abr. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010a.

BRASIL. **Resolução nº 04**, de 15 de dezembro de 2010: Dispõe sobre a aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). p. 1–13, 2010b.

BRASIL MINAS. Agronegócio. **Carbonato de Magnésio**. 2021. Disponível em: <https://brasilminas.net/tag/carbonato-de-magnesio/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

BRONDANI, Michel. **Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BUENO, C. **Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de Sensibilidade**. São Carlos-SP, 2014.

BUYUKSAGIS, I. S.; UYGUNOGLU, T.; TATAR, E. B. T.-C. AND B. M. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 734+, 2017.

CALMON, J. L.; BRAGA, F. D. S.; PREZOTTI, J. C. S. **Projeto básico de central de tratamento de resíduos gerados no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. Vitória-ES, 2007.

CAMPOLINA, J. M. Uma Revisão De Literatura Sobre Softwares Utilizados Em Estudos De Avaliação Do Ciclo De Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 735-750, 2015.

CAMPOS, A. R. DE et al. Resíduos: tratamento e aplicações industriais. In: ESPÍRITO SANTO, V. L. DO; ALVES, T. P. (Eds.). **TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2014. p. 433-492. ISBN: 987-85-8261-0005-3.

CAPITANO, C.; PERI, G.; RIZZO, G. Is the Eco-label EU Decision for hard coverings really capable of capturing the environmental performances of the marble productive chain? A field verification by means of a life cycle approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 5, p. 1022-1035, 2014.

CAREDDU, N.; MARRAS, G.; SIOTTO, G. Recovery of sawdust resulting from marble processing plants for future uses in high value-added products. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 533-539, 2014.

CASAGRANDE, N. M. **Inclusão dos impactos dos resíduos plásticos no ambiente marinho em avaliação de ciclo de vida**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

CASTRO, Alessandra L. et al. Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. In: **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto**. 2015.

CEBRACE. **A Composição do Vidro**. Disponível em: <https://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-composicao-do-vidro>. 2020. Acesso em: 17 mar. 2020.

CELIK, K. et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59-72, 2015.

CHANG, Y.; HUANG, R.; MASANET, E. The energy, water, and air pollution implications of tapping China's shale gas reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 91, n. 2014, p. 100-108, 2014.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, n. 1, p. 395-413, 2015.

CHEHEBE, J. R. B. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. **Qualitymark**, p. 120, 1997.

CHERUBINI, E. **Incertezas na avaliação do ciclo de vida: um estudo de caso na suinocultura = Uncertainties in life cycle assessment: case study of swine production**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

CHIANG, K.-Y.; YEN, H.-R.; LU, C.-H. Recycled gypsum board acted as a mineral swelling agent for improving thermal conductivity characteristics in manufacturing of green lightweight building brick. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 33, p. 34205-34219, 2019.

CHIODI-FILHO, C. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2020**. Belo Horizonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS, 2021.

CHOUHAN, H. S. et al. Investigating use of dimensional limestone slurry waste as fine aggregate in mortar. **Environment, Development and Sustainability**, v. 22, n. 3, p. 2223-2245, 2020.

CINAR, M. E.; KAR, F. B. T.-C. AND B. M. Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 734+, 2018.

CIROTH, A. et al. Life cycle inventory dataset review criteria—a new proposal. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 3, p. 483–494, 2020.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA). **Estratégias corporativas de baixo carbono : setor do vidro**. Brasília-DF: Confederação Nacional da Indústria - CNI, 2016.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA). **Mudança do clima e indústria brasileira: iniciativas e recomendações estratégicas para implementação e financiamento da NDC do Brasil**. Brasília: CNI, 2018.

COBO-CEACERO, C. J. et al. Use of marble sludge waste in the manufacture of eco-friendly materials: applying the principles of the Circular Economy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 35, p. 35399-35410, 2019.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307**, 2002.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 448**, 2012.

CONMETRO (CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, N. E. Q. I. **RESOLUÇÃO CONMETRO Nº 4**, 2010.

CONMETRO (CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, N. E. Q. I. **RESOLUÇÃO CONMETRO Nº 1**, 2017.

COPPOLA, B. et al. Role of natural stone wastes and minerals in the Alkali activation process: A review. **Materials**, v. 13, n. 10, p. 1-36, 2020.

CORCIONE, C. E. et al. Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 276-284, 2018.

COTO, Philippe Dias. **Construção de edifícios energeticamente eficientes: Comparação entre as Classificações Sustentáveis SBTOOL-PT e Procel Edifica**. 2016. Tese de Doutorado. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/11139/1/DM_PhilipeCoto_2016_MEC.pdf. Acesso em: 18 dez. 2021.

DAHOU, M.; BARBACH, R.; MOUSSAOUITI, M. E. Synthesis and Characterization of Belite-rich Cement by Exploiting Alumina Sludge. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 3, p. 1150-1158, 2019.

DAI, T. et al. Life cycle inventory regionalization and uncertainty characterization: A multilevel modeling approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118459, 2020.

DELEO. **Estufa para Secagem e Esterilização**. Disponível em: http://www.deleo.com.br/?page_id=2554. Acesso em: 21 mai. 2021.

DELEO. **Moinho de bolas**. Disponível em: http://www.deleo.com.br/?page_id=2811. Acesso em: 21 mai. 2021.

DHALIWAL, H. et al. A life cycle assessment of packaging options for contrast media delivery: comparing polymer bottle vs. glass bottle. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 12, p. 1965-1973, 2014.

DONG, Y. H.; NG, S. T. A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 8, p. 1166-1180, 2015.

DREYER, L. C.; HAUSCHILD, M. Z.; SCHIERBECK, J. A framework for social life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 88-97, 2006.

ECOCOST. **Sustainable Production Support Tools**. Disponível em: <https://www.adm-global.org/productionsupporttools/index.html>. Acesso em: 15 ago. 2020.

EHRENBERGER, Simone. **Carbon Footprint of Magnesium Production and its Use in Transport Applications**. 2020. Disponível em: <https://cdn.ymaws.com/www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/2020-LCA-Study-2021-02-09.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.

EHRENBERGER, Simone; TAUBER, Martin. **IMA Launches New Magnesium LCA Study**. International Magnesium Association. Light Metal Age. 2021 Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/LMA_FEB_2021_I MA-reprint.pdf. Acesso em: 11 ago. 2021.

ENCICLO. **5 Softwares para realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos seus produtos**. Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/blog/5-softwares-para-realizar-analise-de-ciclo-de-vida-acv-dos-seus-produtos/>. Acesso em: 3 dez. 2019.

FERREIRA, J. V. R. **Análise de Ciclo de Vida dos Produtos**. Viseu (Portugal): Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FIORI, Simone; DE ABREU CYBIS, Luiz Fernando; FERNANDES, Vera Maria Cartana. Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. **RBRH–Rev. Bras. Recur. Hídr.**, v. 19, p. 186-194, 2014.

FOEN (FEDERAL OFFICE FOR THE ENVIRONMENT). **Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method: Methodological fundamentals and their application in Switzerland**. Disponível em: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/economy-consumption/economy-and-consumption--publications/publications-economy-and-consumption/eco-factors-2015-scarcity.html>.

FRASCÁ, M. H. B. DE O. Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas. In: **Tecnologia de Rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 44-98.

FREIRE, L. L. R. A Indústria de vidro planos. **Caderno Setorial ETENE**. Banco Nordeste. n. 3. 2016.

FRISCHKNECHT, R. et al. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 7, p. 957-969, 2015.
FRISCHKNECHT, R. ET AL. Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. **UNEP/SETAC Life Cycle Initiative**, p. 92-978, 2017.

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. B. T.-C. AND B. M. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 769+, 2016.

GARCÍA, N. et al. **Environmental performance of waste based construction materials. LCA study**. Sustainable construction materials and technologies, Coventry. **Anais...Coventry** - U.K: UW Milwaukee CBU, 2007.

GESOĞLU, M. et al. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 160-170, 2012.

GETTU, R. et al. Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. **Materials and Structures**, v. 52, n. 1, p. 10, 2019.

GHORBANI, S. et al. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 185, p. 110+, 2018.

GIESEN, C. VAN DER et al. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. **Journal of Cleaner Production**, p. 120904, 2020.

GIROTTI, S. B. F. T. **Avaliação de Modelos de Caracterização de AICV para a Categoria SMOG Fotoquímico Considerando o Contexto Brasileiro**. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

GIZ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT). **Contas Econômicas Ambientais: O que são?** Disponível em: www.giz.de/brasil. Acesso em: 13 ago. 2020.

GOEDKOOOP, M. et al. **SimaPro Tutorial 2 Colophon Title: SimaPro Tutorial Written by: PRé**. Disponível em: www.pre-sustainability.com. Acesso em: 17 ago. 2020.

GOMES, V. R. et al. Ornamental stone wastes as an alternate raw material for soda-lime glass manufacturing. **Materials Letters**, v. 269, 2020.

GONÇALVES, V. B. O princípio da precaução e a gestão dos riscos ambientais: contribuições e limitações dos modelos econômicos. **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n. 4, p. 121-138, dez. 2013.

GREEN DELTA. **Learning and Support**. Disponível em: <http://www.openlca.org/learning/>. Acesso em: 17 ago. 2020.

GUIMARÃES, T. et al. Efficient removal of Cu(II) and Cr(III) contaminants from aqueous solutions using marble waste powder. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, p. 103972, 2020.

HADI, N. A. R. A.; ABDELHADI, M. Characterization and utilization of oil shale ash mixed with granitic and marble wastes to produce lightweight bricks. **Oil Shale**, v. 35, p. 56+, 22 jun. 2018.

HINZ, R. T. P.; VALENTINA, L. V. D.; FRANCO, A. C. Monitorando o Desempenho Ambiental das Organizações Através da Produção Mais Limpa ou pela Avaliação do Ciclo de Vida. **Revista Produção Online**, v. 7, n. 3, 5 jul. 2008.

HOSSAIN, M. U. et al. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 109, p. 67-77, 1 maio 2016.

HOSSEINIJOU, S. A.; MANSOUR, S.; SHIRAZI, M. A. Social life cycle assessment for material selection: A case study of building materials. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p. 620-645, 2014.

IBERDROLA. **Relatório Pegada Ecológica Corporativa - Exercício de 2020**. 2021. Disponível em: https://www.neoenergia.com/pt-br/sustentabilidade/meio-ambiente/Documents/Pegada-Ambienta-Corporativa_%202020_PORT.pdf. Acesso em 19 dez. 2021.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Produto Interno Bruto**. 2021. Acesso em 17 dez. 2021.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Manual do Sistema ILCD - Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos**. 2014. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/01/Manual-ILCD-com-capa.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Recomendação de Modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. 2019a. Disponível em: <http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/07/Relatório-de-Recomendações-de-Modelos-de-Avaliação-de-Impacto-para-o-Contexto-Brasileiro.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2019.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. 2019b. Disponível em: <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em: 5 dez. 2019.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Histórico da ACV**. 2019c. Disponível em: <http://acv.ibict.br/acv/historico-da-acv/>. Acesso em: 5 dez. 2019.

IBICT (INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA). **Atualização 3.6 do banco de dados da ecoinvent**. 2020. Disponível em: <http://acv.ibict.br/comunicacao/noticias/5960-atualizacao-3-6-do-banco-de-dados-da->

ecoinvent/. Acesso em: 13 ago. 2020.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO). II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral. p. 112, 2014.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO). **Relatório Anual de Atividades Julho de 2018 - Junho de 2019**, 2019.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO). **Relatório Anual de Atividades Janeiro a Dezembro de 2020**. 2020.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO). **Setor Mineral 3T2021**. 2021.

IDEIES (INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO EDUCACIONAL E INDUSTRIAL DO ESPÍRITO SANTO). **Análise de Competitividade do Setor das Indústrias de Rochas Ornamentais do Estado Espírito Santo**. 2020. Disponível em: https://inovacaoedesenvolvimento.es.gov.br/Media/Sectides/Compete/An%C3%A1lise_Compete_Rochas%20Ornamentais_2020.pdf. Acesso em: 17 dez. 2021.

IISBE (INTERNATIONAL INITIATIVE FOR A SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENT). **SBTool**. Disponível em: <https://www.iisbe.org/sbmethod>. Acesso em: 18 dez. 2021.

IJSN (INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES). **MAPAS. Limites e Regionalizações - Divisão Regional do Espírito Santo - Macrorregiões de Planejamento**. 2021. Disponível em: <http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ILCD (INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM). **General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance (Traduzido por Luiz Marcos Vasconcelos 'Manual do Sistema ILCD: Guia geral para avaliações do ciclo de vida - orientações detalhadas**. Brasília-DF: ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010., 2014.

INGRAO, C. et al. The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 75, p. 195-204, 2014.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories**. 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 12 ago. 2021.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 17 ago. 2020.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Global warming of 1.5°C**. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). **Climate Change 2021 - The Physical Science Basis. 2021**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>. Acesso em: 12 ago. 2021.

IPEA (INSITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA). **O que é? FOB**. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=2115:catid=28&Itemid=23. Acesso em: 11 ago. 2020.

ISLAM, S.; PONNAMBALAM, S. G.; LAM, H. L. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 266-278, 2016.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO TS 14048: Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format**, 2002. JANUÁRIO, M. TECNOLOGIA A FAVOR. **M&T - Manutenção & Tecnologia**. Nº 218. p. 12-23. nov.2017.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324-330. 2003.

JØRGENSEN, A.; HERRMANN, I. T.; BJØRN, A. Analysis of the link between a definition of sustainability and the life cycle methodologies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 8, p. 1440-1449, 27 set. 2013.

KABEER, K. I. S. A.; VYAS, A. K. B. T.-C. AND B. M. Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 321+, 22 jun. 2018.

KARACA, Z.; PEKIN, A.; DELIORMANLI, A. H. Classification of dimension stone wastes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 6, p. 2354-2362, 2012. KHODABAKHSHIAN, A. et al. Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 237-251, 2018.

KRUPSKAYA, L. T.; ZVEREVA, V. P.; BUBNOVA, M. B. Wastes from the processing of tin ore as a potential source of pollution of ecosystems and a reduction in the risk of environmental disasters in the Primorsky krai. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 274, n. 1, 2019.

LASVAUX, S. et al. Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters? **Ecological Indicators**, v. 67, p. 174-182, 1 ago. 2016.

LIBRELOTTO, L. I.; FERROLI, P. C. M. **Vidros**. Materioteca Sustentável. Santa Catarina-SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. Disponível em: <https://materioteca.paginas.ufsc.br/vidros/>. Acesso em: 01 jun. 2020.

GIUDICE, A, LO. et al. Life cycle assessment for highlighting environmental hotspots in the Sicilian traditional ceramic sector: the case of ornamental ceramic plates. **Journal of Cleaner**

Production, v. 142, p. 225-239, 2017.

LORENÇÃO, P. Z.; SILVA, F. A. **Utilização da Avaliação do Ciclo de Vida para Levantamento da Viabilidade Ambiental do Efeito da Adição Ativa do Pó de Resíduo Cerâmico no Concreto**. Vitória-ES: Centro Universitário Católico de Vitória, 2018.

LOVREGLIO, R. et al. A dynamic approach for the impact of a toxic gas dispersion hazard considering human behaviour and dispersion modelling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 318, p. 758-771, 2016.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MME, p. 107-126, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1041/3/05.AREIA%20INDUSTRIAL%20ok.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2021.

MAO, L. et al. Effects of electroplating sludge introduction on the morphology, mineral phase and porosity evolution of fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 130+, 22 jun. 2019.

MARÇAL, R. L. S. B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos de corte e polimento da indústria de rochas ornamentais**. 2011. 79f. Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

MARINI, Onildo João. Potencial mineral do Brasil. **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, p. 18-31, 2016. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

MARINKOVIĆ, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M.; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255-2264, 2010.

MARQUES, F. C. et al. Hydrogen production by photovoltaic-electrolysis using aqueous waste from ornamental stones industries. **Renewable Energy**, v. 152, p. 1266-1273, 2020.

MARVILA, M. T. et al. Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 21, n. 5, p. 1250-1261, 2019.

MARVILA, M. T. et al. Gypsum plaster using rock waste: A proposal to repair the renderings of historical buildings in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 250, 2020.

MASHALY, A. O. et al. Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 731-741, 2016.

MAY, P.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. **Economia do meio ambiente: teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2010. ISBN: 978-85-352-3765-8.

MCTIC (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES). **Quarto Relatório de Atualização Bienal do Brasil**. 2020. Disponível

em:

https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/BU_R/BUR4_Brasil_Port.pdf. Acesso em: 02 dez. 2021.

MCTIC (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES). **Emissões por Unidade Federativa**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-por-unidade-federativa>. Acesso em: 04 dez. 2021.

MEDEIROS, D. L. **Avaliação Energética e Ambiental do Saneamento Baseado em Recursos para Aproveitamento da Urina Humana na Agricultura**. 2019. Tese de Doutorado. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/33569>. Acesso em: 01 ago. 2020.

MENDES, Natália Crespo. **Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi:10.11606/D.18.2013.tde-15102013-085143. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-15102013-085143/pt-br.php>. Acesso em: 01 ago. 2021.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2015.

MENDOZA, J. M. F. et al. Life cycle inventory analysis of granite production from cradle to gate. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 153-165, 2014.

MILLER, K. B. **Modelo Parametrizado De Acv: Aplicação Em Sistemas Construtivos Com Estudo De Caso Em Vedações Verticais**. Brasília-DF: Universidade de Brasília, 2015.

MIRABELLA, N.; ALLACKER, K.; SALA, S. Current trends and limitations of life cycle assessment applied to the urban scale: critical analysis and review of selected literature. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 7, p. 1174-1193, jul. 2019.

MISOCZKY, M. C.; BÖHM, S. Do desenvolvimento sustentável à economia verde: a constante e acelerada investida do capital sobre a natureza. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 10, n. 3, p. 546-568, 2012.

MITTRI, S. H. M. et al. Utilisation of heat-treated ornamental stone processing waste as an addition to concretes to improve compressive strength and reduce chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 444-455, 10 nov. 2018.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima na mineração - Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC)**. Brasil, 2013. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima/planos-setoriais-de-mitigacao-e-adaptacao.html>. Acesso em: 01. ago. 2021.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **PNE 2050 - Plano Nacional de Energia. 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-

563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf. Acesso em: 14 dez. 2021.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. B. T.-C. AND B. M. On the production of fired clay bricks from waste materials: a critical update. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 599+, 2014.

MORALES, M. F. D. et al. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119649, 2020.

MAROTO, J. M. M. et al. A study on the valorization of a metallic ore mining tailing and its combination with polymeric wastes for lightweight aggregates production. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 997-1007, 2019.

MOSAFERI, M. et al. Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 16, n. 4, p. 721-730, 2014.

MUNIR, M. J. et al. Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1122-1135, 2018.

MYMRIN, V. et al. Construction materials wastes use to neutralize hazardous municipal water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 800+, 2019.

NAPOLANO, L. et al. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 370-384, 2016.

NASCIMENTO, A. S. et al. Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121808, 2020.

NETTO; LUCENTE. Análise Comparativa e Seleção de Ferramentas para Implantação de um Laboratório Didático de Avaliação de Ciclo de Vida. **XXXVI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2016.

NICOARA, A. I. et al. End-of-Life Materials Used as Supplementary Cementitious Materials in the Concrete Industry. **Materials**, v. 13, n. 8, p. 1954, 2020.

NIGR, E. M. et al. Comparando os Impactos Ambientais dos Processos de Produção Industrial e Artesanal do Doce de Leite por meio de Análise do Ciclo de Vida. **Engevista**, v. 17, n. 3, p. 358, 2015.

NIGRI, E. M.; ROMEIRO, E. F.; ROCHA, S. D. F. Comparando Processos Industriais e Artesanais: Uma Aplicação da Análise Simplificada do Ciclo de Vida na Produção de Cachaça. **XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, p. 14, 2010.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2021. Disponível em:

<https://sustainabledevelopment.un.org>. Acesso em: 04 dez. 2021.

ONU (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS). **Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, diz ONU em dia mundial**. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/81186-humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-toneladas-de-lixo-por-ano-diz-onu-em-dia-mundial/>. Acesso em: 04 dez. 2021.

ORYZASIL. **A Sílica Natural**. 2021. Disponível em: <https://www.oryzasil.com.br/pt-br/produtos>. Acesso em: 20 out. 2021.

PIZÓN, J. et al. Properties of concrete with recycled concrete aggregate containing metallurgical sludge waste. **Materials**, v. 13, n. 6, 2020.

PROSKE, M.; FINKBEINER, M. Obsolescence in LCA—methodological challenges and solution approaches. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 3, p. 495-507, 2020.

RANA, A.; KALLA, P.; CSETENYI, L. J. Sustainable use of marble slurry in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 304-311, 2015.

REBELLO, T. A. **Avaliação do Ciclo de Vida do Processamento de Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Um Estudo Comparativo com Areia, Argila e Filer**. Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. Disponível em: https://ambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/avaliacao_do_ciclo_de_vida_do_processamento_de_lama_do_beneficiamento_de_rochas_ornamentais_um_estudo_comparativo_com_areia_argila_e_filer.pdf. Acesso em: 10 out. 2020.

RIMA. **Magnésio**. 2021. Disponível em: <https://www.rima.com.br/magnesio/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

ROCHA, F. DE A. **Experiência de mineração sustentável de rochas ornamentais**. Seminário Mineração e Meio Ambiente. Brasília-DF: 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/projetos/ordenamento-e-desenvolvimento-sustentavel-da-mineracao-de-rochas-ornamentais-no-noroeste-do-es.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.

RODRIGUES, T. O. **Curso de curta duração Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida-ACV Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento para Manutenção e Validação do Sistema de Inventários do Ciclo de Vida do Brasil**. Disponível em: <http://acv.ibict.br/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

ROJO-LÓPEZ, G. et al. Quaternary blends of portland cement, metakaolin, biomass ash and granite powder for production of self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, 2020.

ROSA, G. M.; SILVA, F. R.; COSTA, J. A. Ações antrópicas e exploração dos recursos ambientais no meio rural, no norte do RS: questões históricas, culturais e desafios para projetar novas atitudes. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e463101019245-e463101019245, 2021.

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 634-642, 2017.

ROY, K. et al. Possible use of gypsum waste from ceramics industry as semi-reinforcing filler in epoxidized natural rubber composites. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 1, p. 285-294, 2020.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 19-32, 2016.

SAHU, R. et al. Moisture resistant stones waste based polymer composites with enhanced dielectric constant and flexural strength. **Composites Part B: Engineering**, v. 182, 2020.

SANTOS, G. G. **Utilização de resíduos de granito como matéria-prima alternativa no preparo de vidros comerciais sodo-cálcicos**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Acesso em: 06 fev. 2022.

SARANI, N. A. et al. Properties and environmental impact of the mosaic sludge incorporated into fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 300+, 22 jun. 2018.

SATOLO, E. G. et al. Techniques and tools of lean production: multiple case studies in brazilian agribusiness units. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 1, 2020.

SATOSHI, E. et al. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: FERRAMENTA GERENCIAL PARA TOMADA DE DECISÃO. **INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**, 2006.

SAUER, A. S.; CALMON, J. L. Life-cycle assessment applied to buildings: gaps in knowledge. **International Journal of Environmental Studies**, v. 00, n. 00, p. 1-19, 2019.

SEBRAE (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS). **Pensamento do Ciclo de Vida: Negócios Conscientes à Caminho da Sustentabilidade**. 2017. Disponível em: https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/AP/Anexos/Sebrae-Ciclo_de_Vida.pdf. Acesso em 20 dez. 2021.

SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**, 2nd Edition - Paperback, Royal Society of Chemistry, 2005. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=ZeF_QLW6-xsC&lpg=PP1&hl=pt-BR&pg=PA119#v=onepage&q&f=false. Acesso em 20 abr. 2021.

SILVA, D. A. L. et al. Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause-effect analysis of the problem. **Sustainable Production and Consumption**, v. 20, p. 304-315, 2019a.

SILVA, J. L. DA et al. Influence of the partial substitution of fine aggregate by granite powder in mortar on the process of natural carbonation. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 3, p. 254-262, 30 ago. 2019b.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117629, 2019.

SILVA, F. B. **Ecoinvent 3.5 dataset documentation | sand quarry operation, open pit mine | sand | Cutoff**, U. Ecoinvent, 2017.

SMMA (SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DA CIDADE DE BELO HORIZONTE). **Selo BH Sustentável**. 2012. Disponível em: <http://cesa.pbh.gov.br/scsae/informativo.smma?method=abrirOquee>. Acesso em: 18 dez. 2021.

SMPU (SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO URBANO DA CIDADE DE RIO DE JANEIRO). **Qualificação QUALIVERDE**. 2013. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/web/smu/exibeconteudo?id=4368435>. Acesso em: 18 dez. 2021.

SINDIROCHAS (SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS). **Exportações de Rochas: NOVEMBRO/2020**. 2020. Disponível em: <https://www.sindirochas.com/relatorio-exportacoes-rochas.php>. Acesso em: 17 ago. 2020.

SINDIROCHAS (SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS). **Informativo mensal: Exportações de Rochas - Novembro2021**. 2021. Disponível em: <https://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/relatorio-exportacao-novembro.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2021.

SINGH, M. et al. A study on environmental and economic impacts of using waste marble powder in concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 13, n. July, p. 87-95, 2017.

SNIC (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO). Relatório Anual 2020. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

SNIC (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO). Resultados Preliminares de Novembro 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=67¬icia=Resultados%20Preliminares%20de%20Novembro%202021>. Acesso em: 18 dez. 2021.

SOARES, S. R.; TOFFOLETTO, L.; DESCHÊNES, L. Development of weighting factors in the context of LCIA. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 6-7, p. 649-660, 2006.

SOUZA, Marcelle Rodrigues de. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS CONSTITUINTES DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MarcelleRodriguesDeSouza.pdf. Acesso em: 10 jun. 2021.

STEINBERG, J. Strategic Sovereignty: A Model of Non-state Goods Provision and Resistance in Regions of Natural Resource Extraction. **Journal of Conflict Resolution**, v. 60,

n. 8, p. 1503-1528, 2016.

SUREAU, S.; NEUGEBAUER, S.; ACHTEN, W. M. J. Different paths in social life cycle impact assessment (S-LCIA)—a classification of type II impact pathway approaches. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 2, p. 382-393, 1 fev. 2020.

TCHADJIÉ, L. N. et al. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. **Ceramics International**, v. 42, n. 2, p. 3046-3055, 2016.

TEKIN, I. et al. Concretes with synthetic aggregates for sustainability. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 425+, 2017.

TEKIN, I. et al. Recycling zeolitic tuff and marble waste in the production of eco-friendly geopolymer concretes. **Journal of Cleaner Production**, p. 122298, 2020.

TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. B. T.-C. AND B. M. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 65+, 22 jun. 2015.

TRESSMANN, D. M. G. A. et al. Research into the use of marble waste as mineral filler in soil pigment-based paints and as an active pigment in waterborne paints. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.

UGREEN. Avaliação de Ciclo de Vida - Fábrica 1 - Roca Brasil Cerâmica. **Avaliação Geral dos Porcelanatos produzidos na Fábrica 1 e produtos LM 60x120 e LM 120x120**. 2020. Disponível em: <https://www.rocaceramica.com.br/wp-content/uploads/2020/11/Relatorio-Publico-ACV-Roca-Brasil-PT.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

ULIANA, J. G. et al. Heat treatment of processing sludge of ornamental rocks: application as pozzolan in cement matrices. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 2, p. 100-123, abr. 2015.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **2019 Global Status Report for Buildings and Construction Sector**. 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector>. Acesso em: 19 dez. 2021.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **2020 Global Status Report for Buildings and Construction Sector**. 2020. Disponível em: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf. Acesso em: 19 dez. 2021.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **2021 Global Status Report for Buildings and Construction**. 2021a. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 19 dez. 2021.

UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). **What is Life Cycle Thinking?**. 2021b. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking/>. Acesso em: 19 dez. 2021.

VANZONILI (FUNDAÇÃO VANZOLINI). **Certificação AQUA-HQE em detalhes - Processo Aqua**. 2020. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/aqua/certificacao-aqua-em-detalhes/>. Acesso em: 28 abr. 2020.

VARDHAN, K.; SIDDIQUE, R.; GOYAL, S. B. T.-C. AND B. M. Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 45+, 2019.

VASHISTHA, P. et al. Valorization of paper mill lime sludge via application in building construction materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 371+, 2019.

VERONES, F. ; et al. LCIA framework and modelling guidance. v. 1, p. 40-57, 2016.

VIEIRA, Eriton Geraldo; REZENDE, Elcio Nacur. Exploração Mineral de Areia e um Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar?. **Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate**, v. 6, n. 2, 2015.

VINCO, L. G. F. et al. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 165–182, 2017.

VINHAL, L. D. **Estudo de Indicadores Ambientais de Blocos Cerâmicos com base em Avaliação do Ciclo de Vida, considerando o Contexto Brasileiro**. SÃO CARLOS-SP: Universidade Federal de São Carlos, 2016.

WANG, S. W.; HSU, C. W.; HU, A. H. An analytical framework for social life cycle impact assessment—part 2: case study of labor impacts in an IC packaging company. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 5, p. 784-797, 2017.

WEIDEMA, B. P.; WESNÆS, M. S. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167-174, 1996.

WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1218-1230, 21 set. 2016.

WILOSO, E. I. et al. Life cycle assessment research and application in Indonesia. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 3, p. 386-396, 2019.

WRI - World Resources Institute. Climate Watch Historical GHG Emissions. Washington, DC: World Resources Institute. 2021. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 01 dez. 2021.

WU, X. et al. A holistic approach to evaluate building performance gap of green office buildings: A case study in China. **Building and Environment**, v. 175, p. 106819, 2020.

XI, Y. et al. Fresh and hardened properties of cement mortars using marble sludge fines and cement sludge fines. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 142+, 2019.

XING, K.; WANG, H.-F.; QIAN, W. A sustainability-oriented multi-dimensional value assessment model for product-service development. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 19, p. 5908-5933, 2013.

YU, M. et al. The impact of value engineering on embodied greenhouse gas emissions in the built environment: A hybrid life cycle assessment. **Building and Environment**, v. 168, 2020.

ZHANG, M. et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 27+, 2018.

ZICHELLA, L. et al. Preliminary investigations on stone cutting sludge processing for a future recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 866-876, 2018.

ZICHELLA, L. et al. Environmental impacts, management and potential recovery of residual sludge from the stone industry: The piedmont case. **Resources Policy**, v. 65, 2020.

ZULCÃO, R. **Avaliação do ciclo de vida da utilização do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em materiais de construção civil à base de cimento**. Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/10699>. Acesso em: 10 out. 2020.

ZULCÃO, R. et al. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A - ICV do Transporte de Materiais com Destino a Cachoeiro de Itapemirim/ES

Materiais	Endereço Completo	Origem	Distância final (KM)
	R. W 2, 935 - São Cristóvão, Nova Venécia - ES, 29830-000	Nova Venécia/ES	779
LBRO	São Domingos do Norte, ES, 29745-000	São Domingos do Norte/ES	685
	Nova Carapina, Rod. Gov. Mário Covas, 81 - Nova Carapina I, Serra - ES, 29175-213	Serra/ES	324
	Vargem Grande do Soturno, Cachoeiro de Itapemirim - ES	Cachoeiro de Itapemirim/ES	28
RQ	Sítio Morro Branco, Rod. Gumercindo Moura Nunes - Vargem Alta, ES, 29295-000	Vargem Alta/ES	70
Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)	Avenida Caetano de Abreu, 55, Encosta do Sol, Itatiba/SP, 13255-830	Itatiba/SP	1700
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	Estrada Alto Moledo, s/n, Salgadinho Itaoca Pedra, Cachoeiro de Itapemirim - ES, 29325-000	Cachoeiro de Itapemirim/ES	50
Carbonato de potássio (K ₂ CO ₃)	Estrada João Paulo, 530 – Honório Gurgel, Rio de Janeiro/RJ, 21512-002	Rio de Janeiro/RJ	838
Carbonato de magnésio (MgCO ₃)	Estrada Alto Moledo, s/n, Salgadinho Itaoca Pedra, Cachoeiro de Itapemirim - ES, 29325-000	Cachoeiro de Itapemirim/ES	50
Dióxido de silício (SiO ₂)	Estrada Analândia/Corumbataí, Km 5, 13550-000	Analândia/SP	964
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	Rua Júlio Michelazzo, 501 - Vila Nossa Senhora de Fátima, São João da Boa Vista/SP, 13.872-900	São João da Boa Vista/SP	1756
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	Bairro Polo Industrial, Av. Brg. Eduardo Gomes, nº 526 - Tubarão, Serra/ES, 29160-904	Vitória/ES	310
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Estrada Gregório Spina, 262, Distrito Industrial Araçariçuama/SP, 18147-000	Araçariçuama / SP	1742

APÊNDICE B – Formulário Utilizado para a Montagem dos Processos do Ciclo De Vida – Exemplo – Processo: Vidro (M1), Após a Fusão

Processo	Vidro (M1), após Fusão	Comentários	Esse plano de coleta serve para coletar dados na empresa ou enviar questionário para o fornecedor preencher					
Produto	Vidro (M1), após Fusão	Comentários	Informar a quantidade e unidade de medição do produto que as informações de entrada e saída estão vinculadas, assim como outras					
Descrição do Processo			O processo "Vidro (M1), após Fusão" recebe o fluxo de produto "Mistura (M1),homog. (Lab.)" para ser destinada ao aterro. O processo "Vidro (M1), após Fusão" demanda de eletricidade e ocupação de solo, no entanto, com a destinação ao Centro de Tratamento a ocupação do solo ficará negativa, pois será evitado a disposição final em aterros.					
ENTRADAS								
Nome	Tipo	Quantidade	Unidade	Origem, Fornecedor e Comentário do	Método de Coleta	Indicador Pedigree	Nome do Fluxo	Nome do Fornecedor do Software
Mistura (M1), homog. (Lab.)	Fluxo de Produto	1	Kg	1 kg da Mistura Homogeneizada	Medido em laboratório	3,4,1,1,1	Mistura (M1),homog. (Lab)	Elaborada pelo autor
Eletricidade	Fluxo de Produto	12.93	kWh	O processo de fusão, que teve duração de 4 h, desligou-se a mufla e as amostras permaneceram resfriando dentro dela por 10 h	Medido em laboratório	1,3,1,1,1	Electricity, low voltage [BR]	Ecoinvent 3.6
INSUMOS/RECURSOS								
TRANSPORTE DE ENTRADA								
SAÍDAS								
Nome	Tipo	Quantidade	Unidade	Destino, Tratador e comentários do Dado	Método de Coleta	Indicador Pedigree	Nome do Fluxo	Nome do Fornecedor do Software
PRODUTO GERADO DESSE PROCESSO, RESÍDUOS PARA TRATAMENTO E EMISSÕES PARA O AMBIENTE								
Emissões no Ar	Fluxo Elementar	0.172	Kg	Emissões de GEE após o aquecimento dos carbonatos no processo de fusão. É perdido cerca de 17,2% da mistura que entra no forno para fusão e transformação em vidro	Medido em laboratório	1,3,1,1,1	Carbon dioxide, fossil	Ecoinvent 3.6
Vidro (M1), após Fusão	Fluxo de Produto	0.828	Kg	Vidro (M1) produzido após a fusão das misturas	Medido em laboratório	1,3,1,1,1	Vidro (M1), após Fusão	Elaborada pelo autor
OBSERVAÇÕES								
* CONSUMO (kWh) = potência (W) x horas de uso por dia (h) x dias de uso no mês / 1000.					5,2kW de acordo com site do aparelho e 7kW de acordo com o manual			
Mufla			4.3100000000	Kw	(https://www.jung.com.br/laboratorial/produto/forno-s-para-extra-alta-temperatura-1600-ac-e-1700-ac/) do equipamento. Aplicando uma média chegou-se em uma potência de 6,1kW. E como o forno pode chegar temperatura até em 1700°, foi realizada um cálculo proporcional, onde 6,1kW seria a potência do forno a 1700° e como o procedimento foi a 1200°, chegou-se a 4,31kW.			
1 CV = 735,5 W							6.1	1700
Transformando em Watts			4310	W			x	1200
Horas de uso			3	Consumo do forno Mufla para fundir a Mistura M1				4.305882353
Dias			1					
Consumo (kWh) =			12.93					

APÊNDICE C – ICV dos Processos do Ciclo de Vida para Produção do Vidro

Processos	Tipo do fluxo	Fluxo	Qtd.	Und.	Fonte	CF	CP	CT	CG	TEC
Areia Industrial (Sílica)	Energia	Óleo diesel (<i>Diesel, burned in build. Machine</i>)	0,0216	MJ	Estimativa para empresa que os dados foram levantados	3	4	1	1	1
	Energia	Gás natural (<i>heat, district or industrial, natural gas</i>)	0,1824	MJ	Estimativa para empresa que os dados foram levantados	3	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,07334	kWh	Estimativa para empresa que os dados foram levantados	3	4	1	1	1
	Solo	Ocupação de Solo (<i>Occupation, mineral extraction site</i>)	5,283E-3	m ² a	Estimativa para empresa que os dados foram levantados	3	4	1	1	1
	Material	Areia quartzosa (<i>Sand, quartz</i>)	1	Kg	Sem perdas assumidas	4	4	1	3	1
	Material	Água (<i>Water, unspecified natural origin, BR</i>)	2,0158E-4	m ³	Ecoinvent 3.6 – Silva (2017)	3	4	4	3	3
Transporte	Transporte interno (<i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3</i>)	1,4	kg.km	Estimativa para empresa que os dados foram levantados	3	4	1	1	1	
LBRO, lama (resíduo da pedreira)	Material	LBRO, lama (umidade: 70%)	1,478	kg	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
LBRO, torta (filtro prensa – AAMOL)	Material	LBRO, lama (umidade: 70%)	1,478	Kg	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
		Água recuperada, retorna para beneficiamento (<i>Water, well, BR</i>)	-4,78E-4	m ³	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	5,92E-4	kWh	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
	Solo	Ocupação de aterro evitada (<i>Occupation, dump site</i>)	-5,21E-4	m ² a	Estimativa de Zulcão (2018), baseado na CTR AAMOL. ¹³	4	4	1	1	1

¹³ Ensaios de compactação determinaram que a massa específica aparente seca máxima do material após desidratado é de aproximadamente 1,6 t/m³ (CALMON; BRAGA; PREZOTTI, 2007), sendo assim, uma tonelada do resíduo no aterro ocupa 0,625 m³. Considerando a profundidade média total do aterro do projeto da AAMOL de 12 m, subdividida em 7 m de altura de escavação e 5 m de acréscimo com acúmulo de resíduos, 1 m² de solo possui a capacidade de reservar 12 m³ do resíduo. Sendo assim, a área equivalente de 1 tonelada de resíduo no aterro é de 5,21 x 10⁻² m². Adotando uma vida útil de 10 anos (vida útil mínima de um aterro sanitário), tem-se como ocupação evitada do solo de 5,21 x 10⁻¹ m²-a/t de RBRO. Ou seja, 0,625m³ / 12m³ = 0,0520833333333333 ou 5,21 x 10⁻¹ m²

Processos	Tipo do fluxo	Fluxo	Qtd.	Und.	Fonte	CF	CP	CT	CG	TEC
LBRO, seco (ar livre - AAMOL)	Material	LBRO, torta (filtro prensa – AAMOL) (umidade: 15%)	1,106	Kg	Estimativa, baseado na Zulcão (2018)	3	4	1	1	1
	Energia	Trator com plaina niveladora (<i>machine operation, diesel, $\geq 18,64$ kW and $< 74,57$ kW, generators</i>)	0,04	s	Estimativa, baseado na Zulcão (2018)	4	4	1	1	4
	Transporte	Transporte interno (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	1,5	kg.km	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
		Transporte da LBRO, seco (ar livre) (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	28, 324, 685 e 779	kg.km	Estimativa referente às diferentes macrorregiões	3	4	1	1	1
Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	0,106	Kg	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1	
LBRO, homog. (Lab.)	Materiais	LBRO, seco (ar livre - AAMOL) (umidade: 4%)	1,04	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,49	kWh	Estimativa, baseada em Deleo (2021) ¹⁴	3	4	1	1	3
LBRO, seco (Lab.)	Materiais	LBRO, homog. (Lab.)	1,04	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	5
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	2,64	kWh	Estimativa, baseada em Deleo (2021) ¹⁵	3	4	1	1	3
	Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	0,04	Kg	Estimativa, baseado em Zulcão (2018), CTR AAMOL (2021)	3	4	1	1	1
RQ, lama (resíduo da pedreira)	Materiais	RQ, lama (resíduo da pedreira) (umidade: 70%)	1,478	kg	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
RQ, torta (filtro prensa)	Materiais	RQ, lama (resíduo da pedreira) (umidade: 70%)	1,478	Kg	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
	Emissões	Água recuperada, retorna para beneficiamento (<i>Water, well, BR</i>)	-4,78E-4	m ³	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	5,92E-4	kWh	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
	Solo	Ocupação de aterro evitada (<i>Occupation, dump site</i>)	-5,21E-4	m2a	Adotada a mesma estimativa da LBRO	4	4	1	1	1

¹⁴ Consumo do Moinho de Bolas Deleo para Homogeneizar a LBRO por 2 horas.

¹⁵ Consumo da Estufa DeLeo para Secar a LBRO por 2 horas.

Processos	Tipo do fluxo	Fluxo	Qtd.	Und.	Fonte	CF	CP	CT	CG	TEC
RQ, seco (ar livre - Pedreira)	Materiais	RQ, torta (filtro prensa) (umidade: 15%)	1,106	Kg	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
	Energia	Trator com plaina niveladora (<i>Machine operation, diesel, 18.64 to 74.57 kW, high-load</i>)	0,04	s	Adotada a mesma estimativa da LBRO	4	4	1	1	4
	Transporte	Transporte interno (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	1,5	kg.km	Adotada a mesma estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
		Transporte da RQ, seco (ar livre) (<i>lorry 16-32 metric ton, EURO3</i>)	70	kg.km	Estimativa com base em cálculo pelo Google Maps	3	4	1	1	1
	Emissões	Água evaporada (<i>water, to air</i>)	1,06E-4	m3	Estimativa da LBRO	3	4	1	1	1
RQ, homog. (Lab.)	Materiais	RQ, seco (ar livre - Pedreira) (umidade: 4%)	1,04	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,25	kWh	Estimativa, baseada em Deleo (2021) ¹⁶	3	4	1	1	3
LBRO, caracterizado (DRX)	Materiais	LBRO, seco (Lab.)	1	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,603	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
LBRO, após FRX	Materiais	LBRO, caracterizado (DRX)	1	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,667	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
Mistura (M1), pesada	Materiais	LBRO, após FRX	0,6047	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		RQ, homog. (Lab.)	0,1148	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Cálcio - CaCO ₃	0,1572	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Sódio - Na ₂ CO ₃	0,2068	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Potássio - K ₂ CO ₃	0,1028	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,00034	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5

¹⁶ Consumo do Moinho de Bolas Deleo para Homogeneizar o RQ por 1 hora.

Processos	Tipo do fluxo	Fluxo	Qtd.	Und.	Fonte	CF	CP	CT	CG	TEC
Mistura (M2), pesada	Materiais	Carbonato de Cálcio - CaCO ₃	0,1964	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Sódio - Na ₂ CO ₃	0,2223	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Potássio - K ₂ CO ₃	0,0044	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Carbonato de Magnésio - MgCO ₃	0,00418	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Dióxido de silício (Sílica) - SiO ₂	0,74	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	0,015	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	0,002	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
		Dióxido de enxofre - SO ₂	0,002	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,00053	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
Mistura (M1), homog. (Lab.)	Materiais	Mistura (M1), pesada	1	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,25	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
Mistura (M2), homog. (Lab.)	Materiais	Mistura (M2), pesada	1	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	0,25	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
Vidro (M1), após Fusão	Materiais	Mistura (M1), homog. (Lab.)	1	1	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage [BR]</i>)	12,93	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
	Emissões	Emissões no Ar (<i>Carbon dioxide, fossil</i>) ¹⁷	0,172	Kg	Estimativa com base nas perdas de massa do material	1	3	1	1	1

¹⁷ Emissões de GEE após o aquecimento dos carbonatos no processo de fusão. É perdido cerca de 17,2% da mistura que entra no forno para fusão e transformação em vidro.

Processos	Tipo do fluxo	Fluxo	Qtd.	Und.	Fonte	CF	CP	CT	CG	TEC
Vidro (M2), após Fusão	Materiais	Mistura (M2), homog. (Lab.)	1	1	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage</i> [BR])	17,24	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
	Emissões	Emissões no Ar (<i>Carbon dioxide, fossil</i>)	0,172	Kg	Estimativa com base nas perdas de massa do material	1	3	1	1	1
Vidro (M1), recozido	Materiais	Vidro (M1), após Fusão	0,828	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage</i> [BR])	4,31	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
	Emissões	Emissões no Ar (<i>Carbon dioxide, fossil</i>) ¹⁸	0,043	Kg	Estimativa com base nas perdas de massa do material	1	4	1	1	1
Vidro (M2), recozido	Materiais	Vidro (M2), após Fusão	0,828	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage</i> [BR])	4,31	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
	Emissões	Emissões no Ar (<i>Carbon dioxide, fóssil</i>)	0,043	Kg	Estimativa com base nas perdas de massa do material	1	4	1	1	1
Vidro (M1), polido	Materiais	Vidro (M1), recozido	0,785	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage</i> [BR]) ¹⁹	0,011	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5
Vidro (M2), polido	Materiais	Vidro (M2), recozido	0,785	Kg	Medido em laboratório do Centro Universitário São Camilo	1	4	1	1	1
	Energia	Eletricidade (<i>Electricity, medium voltage</i> [BR])	0,011	kWh	Estimativa	2	4	1	1	5

¹⁸ Adotou o mesmo % de perdas no processo de fusão para o processo de recozimento, apenas fazendo uma proporção em relação ao tempo do forno ligado, ao invés de 4 horas, o recozimento foi de apenas 1 hora.

¹⁹ Consumo do Makita para polimento do vidro.

APÊNDICE D – Representação de cada Etapa nos Impacto Ambientais dos Vidro M1 (LBRO) e do Vidro M2 (Areia Industrial, Sílica)

Processos	CED	IPCC 2013	Impact 2002+
	(MJ eq)	(Kg CO2 eq)	Impacto total (mPt)
VIDRO M1 (LBRO)¹			
LBRO, torta (Filtro prensa – AAMOL) ²	0,00371	0,00012	-0,00003
LBRO, seco (Ar livre – AAMOL)	0,00911	0,00368	0,00120
LBRO, homog. (Laboratório)	3,06000	0,10050	0,03802
LBRO, seco (Laboratório)	16,49000	0,53000	0,20480
RQ, torta (Filtro prensa)	0,00371	0,00012	-0,00003
RQ, seco (Ar livre – Pedreira)	0,00911	0,00368	0,00120
RQ, homog. (Laboratório)	3,06000	0,10050	0,03802
LBRO, caracterizado (DRX)	3,77000	0,12000	0,03520
LBRO, após FRX	4,16000	0,13350	0,05175
Mistura (M1), pesada	0,00213	0,00007	0,00003
Mistura (M1), homog. (Laboratório)	1,61000	0,05030	0,01945
Vidro (M1), após fusão	80,80000	2,78000	1,03000
Vidro (M1), recozido	26,90000	0,91000	0,34000
Vidro (M1), polido	0,06900	0,00221	0,00085
VIDRO M2 (areia industrial, sílica)³			
Areia industrial (sílica)	0,96995	0,04580	0,01806
Mistura (M2), pesada	0,00213	0,00007	0,00003
Mistura (M2), homog. (Laboratório)	1,61000	0,05030	0,01945
Vidro (M2), após fusão	107,76000	3,64000	1,36000
Vidro (M2), recozido	26,90000	0,91000	0,34000
Vidro (M2), polido	0,06900	0,00221	0,00085
PROCESSOS DE TRANSPORTE PARA AMBOS OS VIDROS⁴			
Transporte de CaCO3 - Carbonato de Cálcio (Dolomita)	0,13626	0,00825	0,00450
Transporte de Fe2O3 - Óxido de Ferro	0,84717	0,05150	0,02831
Transporte de K2CO3 - Carbonato de Potássio	2,28287	0,14000	0,07572
Transporte de MgCO3 - Carbonato de Magnésio	0,13630	0,00825	0,00450
Transporte de Na2CO3 - Carbonato de Sódio (Barrilha)	4,64846	0,28000	0,15320
Transporte de SO2 - Dióxido de Enxofre	5,85950	0,28700	0,15720
Transporte de AL2O3 - Carbonato de Alumínio	4,75300	0,29150	0,15855
Transporte de SiO2 - Sílica	1,48000	0,08800	0,05000

Nota¹: Processos sem a incidência do cálculo de transporte;

Nota²: O impacto total do método Impact 2002+ onde ocorre a somatória de todas as categorias *midpoint*, convertidas em *endpoint* e normalizadas para uma pontuação única, que somados encontramos o valor negativo para impacto total (levou-se em consideração o reaproveitamento de água e a não destinação da lama para um aterro);

Nota³: Processos sem a incidência do cálculo de transporte;

Nota⁴: Para o Vidro M1 (LBRO), contabilizou apenas os transportes do Carbonato de Cálcio, Potássio e Sódio.

Fonte: Elaboração própria, 2022.

ANEXOS

ANEXO A – Definição e/ou Unidades das Categorias de Impacto

- Mudanças climáticas (*Climate change*): O potencial de aquecimento global é a capacidade de um gás de efeito estufa de influir no forçamento radioativo, expressa em termos de uma substância de referência e de um horizonte temporal. Relacionado com a capacidade de influir nas alterações da temperatura média mundial na interface superfície-ar e nos parâmetros climáticos e seus efeitos. Unidade: kg equivalente de CO₂ (dióxido de carbono);
- Pontuação única (Pontos ou Pt): Pontuação que faz referência à globalidade de todo o impacto associado a determinados aspectos ambientais. Obtida através do cálculo em diferentes etapas, normalizando e ponderando diferentes categorias de impacto ambiental para chegar a um único número final. Unidade: Pt (pontos);
- Toxicidade humana (*Human toxicity*): Os efeitos nocivos para a saúde humana pela absorção de substâncias tóxicas por inalação de ar, a ingestão de alimentos ou água ou a penetração através da pele na medida em que estejam relacionados com o câncer. Unidade: kg equivalentes de 1,4-DB (diclorobenzeno);
- Esgotamento de recursos minerais (*Metal depletion*): Categoria de impacto ambiental que se refere ao esgotamento de recursos minerais tais como metais ou rochas. Faz referência ao consumo de materiais extraídos da natureza (medido em peso). Unidade: kg Fe equivalente (ferro);
- Esgotamento de combustíveis fósseis (*Fossil depletion*): Categoria de impacto ambiental que se refere ao uso de combustíveis procedentes do petróleo, carvão ou gás natural não renovável. É medido em unidades de energia. Unidade: kg oil equivalente;
- Uso da água (*Water depletion*): Categoria de impacto ambiental referente ao uso da água. A água é um recurso escasso no planeta e cada vez mais apreciado. A conscientização com relação ao esgotamento do recurso água conduziu ao desenvolvimento do conceito Pegada Hídrica. Unidade: m³ (metros cúbicos);
- Potencial de mudança de temperatura global (GTW): Categoria de impacto ambiental referente ao potencial de aumento da temperatura média do planeta devido a emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Provocando derretimento das geleiras, aumento dos níveis dos oceanos, mudanças dos eventos climáticos (precipitação, etc.) Unidade: CO₂, eq. (Ex: CH₄ = 21 x CO₂);

- Formação de oxidantes fotoquímicos (*Photochemical oxidant formation*): A formação de ozônio a nível do solo da troposfera devido à oxidação fotoquímica de compostos orgânicos voláteis (COV) e de CO na presença de óxidos de nitrogênio (NO_x) e luz solar. São nocivas para a vegetação, vias respiratórias e materiais artificiais. Unidade: kg de NMVOC (compostos orgânicos voláteis de não metano);
- Radiação ionizante (*Ionising radiation*): Os efeitos nocivos para a saúde humana devido a descargas radioativas. Unidade: kBq U235 equivalente (urânio 235);
- Ecotoxicidade aquática (*Aquatic ecotoxicity*): Os CFs de ecotoxicidade aquática" são dados para emissões no ar, água e solo e quantificam os efeitos da ecotoxicidade sobre a água doce (superfície) (referindo-se a córregos e lagos). Não há CFs disponíveis para emissões em águas subterrâneas, estratosfera e oceanos. Os CFs de ecotoxicidade aquática para metais pesados só se aplicam a metais emitidos em forma dissolvida (íons);
- Ecotoxicidade terrestre (*Terrestrial ecotoxicity*): Os CFs de ecotoxicidade terrestre são calculados de forma semelhante aos CFs de ecotoxicidade aquática para emissões de ar, água e solo. CFs para metais pesados só se aplicam a metais emitidos em forma dissolvida (íons). Estima-se que as substâncias tenham efeitos ecotóxicos apenas pela exposição através da fase aquosa no solo;
- Acidificação aquática (*Aquatic acidification*): Os CFs para acidificação aquática são dados para emissões no ar, água e solo;
- Energia não renovável (*Non-renewable energy*): Os CFs para o consumo de energia não renovável, em termos da energia primária total extraída, são calculados utilizando-se valores de aquecimento superiores. Os CFs de dano são expressos em MJ total de energia/unidade primária não renovável extraída (unidade é kg ou m³). Os CFs de ponto médio são expressos em MJ também. Os CFs de ponto médio podem ser expressos em kg Petróleo-eq (860 kg/m³)/kg extraído, obtido pela divisão do dano CF da substância considerada pelo dano CF da substância de referência (petróleo bruto=860 kg/m³), no entanto, isso não é recomendado para uso;
- Unidade DALY: ("Deficiência Ajustada de Anos de Vida") caracteriza a gravidade da doença, representando mortalidade por (anos de vida perdidos por morte prematura) e morbidade (o tempo de vida com menor qualidade devido a uma doença, por exemplo, no hospital). Os valores padrões da DALY de 13 e 1,3 [anos/incidência] são adotados para a maioria dos efeitos cancerígenos e não cancerígenos. Por exemplo, um produto com um

escore de saúde humana de 3 DALYs implica a perda de três anos de vida sobre a população global;

- Unidade PDF.m².y: ("Potencial de Desaparecimento de Espécies, por área por ano") é a unidade para "medir" os impactos nos ecossistemas. O PDF.m².y representa a fração de espécies que desapareceu em 1 m² da superfície da Terra durante um ano. Por exemplo, um produto com uma pontuação de qualidade do ecossistema de 0,2 PDF.m².y implica a perda de 20% das espécies em 1 m² da superfície da Terra durante um ano;

Unidade MJ: MJ ("Mega Joules") mede a quantidade de energia extraída ou necessária para extrair o recurso.

ANEXO B – Formulário para Coleta de Dados do Inventário do Ciclo de Vida - Enviado para um Fornecedor

Produto Final: Areia industrial para produção de vidro			
Qtd.	Unid.	Processo	Observações:
ton/mês	ton/mês	Areia/Mineração (extração)	Valor médio mensal de rocha extraída na jazida em 2020 (média dos 12 meses)
	m²	Área da jazida	
	anos	Vida útil estimada da jazida	Valor estimado
	m	Profundidade da jazida	Valor médio
	t/m³	Densidade da Rocha	Intervalo ou valor médio
	ton/mês	Explosivo para detonação	Consumo médio mensal em 2020 (média dos 12 meses)
	l/mês	Diesel para o transporte da jazida à fábrica	Consumo médio mensal em 2020 (média dos 12 meses)
	ton/mês	Calcário Britagem / 1ª Etapa	Valor médio mensal de calcário britado em 2020 (média dos 12 meses)
	h/mês	1º britador. Tipo: Mandíbula	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do britador em 2020 (média dos 12 meses)
	cv		
	h/mês		Valor médio mensal do tempo de funcionamento do britador em 2016 (média dos 12 meses)
	cv		
	ton/mês	Calcário Moagem / Etapa 2 de Cominuição	Valor médio mensal de calcário britado em 2020 (média dos 12 meses)
	h/mês	Moinho 1. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 2. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 3. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 4. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 5. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Moinho 6. Tipo:	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do moinho em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do conjunto do moinho 1	
	h/mês	Filtro de manga	Valor médio mensal do tempo de funcionamento do filtro manga em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do filtro	
	h/mês	Outros motores (esteiras, dutos, etc.)	Valor médio mensal do tempo de funcionamento em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Soma da potência dos outros motores	
	ton/mês	Produção final/Vendas	Valor médio mensal de cada produto produzido em 2020 (média dos 12 meses)
	ton/mês	Areia média	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: () 1 () 2; Moinho: () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () filtro de manga
	ton/mês	Areia fina	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: () 1 () 2; Moinho: () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de cálcio peneirado	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: () 1 () 2; Moinho: () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de cálcio fino	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: () 1 () 2; Moinho: () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () filtro de manga
	ton/mês	Carbonato de cálcio micronizado	Forma de saída final/venda: () Saco ___ kg ; () Big bag ___ kg Equipamentos de produção: Britador: () 1 () 2; Moinho: () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6 () filtro de manga
	h/mês	Ensacadeiras	Valor médio mensal do tempo de funcionamento das ensacadeiras em 2020 (média dos 12 meses)
	cv	Potência do motor da ensacadeira	
	kWh/mês	Consumo médio mensal de energia de toda a fábrica	(médias dos 12 meses)