

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JADE RODRIGUES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO VIDRO EMPREGADO EM FACHADAS DO
TIPO VIDRO ESTRUTURAL (STRUCTURAL GLAZING): ESTUDO DE CASO DO
PRÉDIO DA ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE RONDÔNIA**

PORTO VELHO
2023

JADE RODRIGUES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO VIDRO EMPREGADO EM FACHADAS DO
TIPO VIDRO ESTRUTURAL (STRUCTURAL GLAZING): ESTUDO DE CASO DO
PRÉDIO DA ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE RONDÔNIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Fundação Universidade Federal de Rondônia como requisito para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador (a): Prof.^a Me. Tatiane Emílio Checchia

PORTO VELHO
2023

JADE RODRIGUES DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO VIDRO EMPREGADO EM FACHADAS DO TIPO VIDRO ESTRUTURAL (STRUCTURAL GLAZING): ESTUDO DE CASO DO PRÉDIO DA ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE RONDÔNIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Fundação Universidade Federal de Rondônia como requisito para obtenção do título de Engenheira Civil.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente



TATIANE EMILIO CHECCHIA

Data: 16/10/2023 20:01:09-0300

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

Prof.^a Me. Tatiane Emílio Checchia (Orientadora) – Unir

Documento assinado digitalmente
gov.br RADUAN KRAUSE LOPES
Data: 16/10/2023 17:42:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raduan Krause Lopes (Membro) – Unir

Documento assinado digitalmente



MARCELO AUGUSTO RAMBO

Data: 16/10/2023 11:11:07-0300

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

Eng. Civil Esp. Marcelo Augusto Rambo (Membro) – Unir

Porto Velho, 11 de outubro de 2023

Catalogação da Publicação na Fonte
Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR

O48a Oliveira, Jade Rodrigues de.
Avaliação do ciclo de vida do vidro empregado em fachadas do tipo vidro estrutural (structural glazing): estudo de caso do prédio da Assembleia Legislativa de Rondônia / Jade Rodrigues de Oliveira. - Porto Velho, 2023.

87 f.: il.

Orientadora: Profa. Me. Tatiane Emílio Checchia.

Monografia (Graduação). Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Tecnologia.
Fundação Universidade Federal de Rondônia.

1. Vidro laminado. 2. Análise do ciclo de vida. 3. Fachada de vidro. I. Checchia, Tatiane Emílio. II. Título.

Biblioteca Central

CDU 624

“Que tenhamos a humildade e o merecimento pra receber a luz dos Orixás.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elizete e Edevilson e ao meu irmão Rodrigo, por sempre acreditarem no meu potencial; por todo carinho, companheirismo e apoio durante toda a vida, principalmente nesta fase final do curso. Devo todas as palavras escritas neste trabalho a vocês.

Agradeço também à minha família inteira, aos Rodrigues e aos Oliveiras, por terem participado de todos os momentos da minha existência que me tornaram quem sou hoje.

Agradeço ao Rafael, pessoa de maior coração que já conheci, e que me ajudou em todas as linhas deste trabalho, além da participação em momentos felizes e difíceis, me fazendo enxergar que existia sim uma esperança para cada dificuldade que a mente atravessava.

Agradeço a todos os meus amigos, amigos on-line e colegas de turma, em especial Emmanuela, Giovanna, Itamar e Wândala, que compartilharam momentos desde os primórdios deste curso até os segundos finais da conclusão. Tivemos incríveis histórias que serão passadas para frente, e com cada um de vocês aprendi algo.

Agradeço a minha orientadora, Professora Mestre Tatiane Emílio Checchia, por toda paciência, cuidado e confiança ao me guiar ao longo da execução deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Mestre Fabiano Medeiros da Costa e ao Professor Doutor Diego Henrique de Almeida, por acreditarem que o potencial sempre existiu, só precisava de ser explorado. Diversas vezes vocês, mesmo que não dito dessa maneira, subentenderam em palavras de apoio que desistir não era uma opção. Cá estou eu!

Agradeço aos ensinamentos e inspiração que personagens como Link, Lara Croft, Jane Shepard, Yoshioka Futaba, Edward e Alphonse Elric, Tony, Peter e Mulan me deram. Todos vocês, de alguma maneira, moldaram quem sou hoje, e busquei sempre seguir a bondade e heroísmo que todos passaram.

Agradeço à Deus, por em vários momentos ser a maior luz que necessitava para seguir em frente. Também agradeço à Cigana da Estrada e a Dona Janaína, que me guiaram para o rumo do amor-próprio e auto confiança.

Agradeço à minha prima Ananda, por ser o ser humano mais puro a pisar nesta terra e deixar lindas memórias de amor e carinho. Descanse em paz, sentimos sua falta.

RESUMO

A utilização de vidro em fachadas tornou-se uma prática popular na arquitetura do Brasil, especialmente em edifícios de grande porte para diversos fins, proporcionando uma estética moderna. Porém, este tipo de material remonta a um grande consumo de recursos naturais, energia e emissão de poluentes quando comparado a outros tipos na indústria da construção, sendo necessário identificar e buscar soluções para reduzir os impactos ambientais relacionados à etapa de produção. O propósito deste estudo foi analisar os efeitos ambientais relacionados à fabricação, beneficiamento e deslocamento do vidro laminado empregado em fachadas do tipo *structural glazing*, com base no estudo de caso do prédio da Assembleia Legislativa de Rondônia, que possui este tipo de fachada, através da Avaliação do Ciclo de Vida, método que avalia aspectos e os impactos no meio ambiente acerca do ciclo de vida em um produto, em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelas normas NBR ISO 14040 e 14044, e também da norma europeia EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021. Para o Inventário do Ciclo de Vida, foi realizada a busca por informações disponíveis em bancos de dados internacionais gratuitos para este fim. O estudo baseou-se em quatro Declarações Ambientais de Produto de companhias europeias e resultados obtidos pelo *software Open LCA*. Dados sobre a laminação foram fornecidos por uma indústria local em Ji-Paraná/RO. Os resultados da comparação entre quatro fontes bibliográficas e o *software*, considerando todas as etapas do ciclo de vida para uma área de 3.156,43m² de vidro laminado (utilizado no estudo de caso), destacam as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, eutrofização potencial, destruição da camada de ozônio, formação fotoquímica de ozônio, esgotamento de recursos não-biológicos e acidificação potencial. As mudanças climáticas representaram mais de 98% dos impactos totais, devido às emissões associadas à extração da matéria-prima, uso de energia e transporte. Em contraste, a destruição da camada de ozônio e o esgotamento de recursos não-biológicos tiveram impactos relativamente baixos. As discrepâncias nos resultados podem ser atribuídas à inconsistência entre os dados e variações geográficas nos estudos. Estratégias como otimização de processos, eficiência energética, reuso de água e opções de transporte sustentáveis surgem como alternativas promissoras para mitigar os impactos dessas fontes. Os resultados informarão as partes envolvidas para uma gestão mais sustentável.

Palavras-chave: Análise do Ciclo de Vida (ACV); Structural Glazing; Vidro Laminado; Impactos Ambientais; Fachada de vidro.

ABSTRACT

The use of glass in facades has become a popular practice in Brazilian architecture, especially in large buildings for various purposes, providing a modern aesthetic. However, this type of material entails a significant consumption of natural resources, energy, and pollutant emissions when compared to other types in the construction industry, making it necessary to identify and seek solutions to reduce the environmental impacts related to the production stage. The purpose of this study was to analyze the environmental effects related to the manufacturing, processing, and transportation of laminated glass used in structural glazing facades, based on a case study of the Legislative Assembly building of Rondônia, which features this type of facade. This was done through Life Cycle Assessment (LCA), a method that evaluates aspects and impacts on the environment throughout the life cycle of a product, in accordance with the guidelines established by the NBR ISO 14040 and 14044 standards, as well as the European standard EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021. For the Life Cycle Inventory, information was obtained from freely available international databases for this purpose. The study relied on four Environmental Product Declarations from European companies and results obtained from the Open LCA software. Data on lamination were provided by a local industry in Ji-Paraná/RO. The results of the comparison between four bibliographic sources and the software, considering all stages of the life cycle for an area of 3,156.43m² of laminated glass (used in the case study), highlight the following impact categories: climate change, potential eutrophication, ozone layer depletion, photochemical ozone formation, non-biological resource depletion, and potential acidification. Climate change accounted for over 98% of the total impacts, due to emissions associated with raw material extraction, energy use, and transportation. In contrast, ozone layer depletion and non-biological resource depletion had relatively low impacts. Discrepancies in the results may be attributed to data inconsistency and geographical variations in the studies. Strategies such as process optimization, energy efficiency, water reuse, and sustainable transportation options emerge as promising alternatives to mitigate the impacts of these sources. The results will provide stakeholders with information for more sustainable management.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Structural Glazing; Laminated Glass; Environmental Impacts; Glass Facade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Catedral de <i>Saint Chapelle</i> , Paris, um dos maiores exemplos do início de utilização do vidro como adorno arquitetônico e na construção civil.....	21
Figura 2 - <i>SkyGlass</i> Canela: uma das maiores plataformas de vidro no mundo, localizada no Brasil.....	23
Figura 3 – Processo de fabricação do vidro <i>float</i>	24
Figura 4 – Processo de têmpera do vidro	25
Figura 5 – Comparação entre o vidro comum e o vidro temperado	25
Figura 6 – Esquema de montagem do vidro laminado com PVB ou EVA	26
Figura 7 – Processo de fabricação do vidro laminado.....	26
Figura 8 – Esquema de montagem do vidro duplo.....	27
Figura 9 – Prédio da <i>Citibank</i> , concluído em 1986, fachada em pele de vidro, na Avenida Paulista.	29
Figura 10 – Prédio da <i>Berrini One</i> , em pele de vidro, em São Paulo.....	29
Figura 11 - Esquema de montagem do sistema <i>Stick</i>	32
Figura 12 - Esquema de montagem do sistema <i>structural glazing</i>	33
Figura 13 - Esquema de montagem do sistema <i>structural glazing</i> , em vista de corte e planta baixa.	34
Figura 14 - Estágios do ciclo de vida de um produto	37
Figura 15 – Fronteiras do sistema de ACV do vidro laminado.....	45
Figura 16 - Planta baixa do prédio de objeto de estudo	50
Figura 17 – Fotografia do prédio de estudo.....	50
Figura 18 - Contribuição para o impacto ambiental em mudanças climáticas de cada empresa, em comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	64
Figura 19 - Contribuição para o impacto ambiental na Eutrofização de cada empresa, em comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	66
Figura 20 - Contribuição para o impacto ambiental na Destruição da Camada de Ozônio de cada empresa, em comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	67
Figura 21 - Contribuição para o impacto ambiental na Formação Fotoquímica de Ozônio de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	69

Figura 22 - Contribuição para o impacto ambiental no Esgotamento de Recursos Não-Biológicos de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	70
Figura 23 - Contribuição para o impacto ambiental na Acidificação Potencial de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no <i>software Open LCA</i>	71
Figura 24 - Contribuição total de cada bibliografia por impacto ambiental.....	74
Figura 25 - Comparação das bibliografias em relação ao quantitativo total de emissões.	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sistemas de fachada de vidro ao longo do desenvolvimento construtivo	30
Quadro 2 - Categorias e indicações de unidade de impacto ambiental	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Entradas e saídas de recursos do estágio de produção do vidro laminado	52
Tabela 2 - Entrada de energia no sistema de beneficiamento para 1m ² de vidro laminado	57
Tabela 3 - Entrada de água pela beneficiadora para 1m ² de vidro laminado	58
Tabela 4 - Entrada de produtos pela beneficiadora para 1m ² de vidro laminado	58
Tabela 5 – Impacto ambiental referente às mudanças climáticas, em kg CO ₂ eq.	63
Tabela 6 - Impacto ambiental referente à Eutrofização Potencial, em kg PO ₄ eq.	65
Tabela 7 - Impacto ambiental referente à destruição da Destruição da Camada de Ozônio, em kg CFC-11 eq.	67
Tabela 8 - Impacto ambiental referente à Formação Fotoquímica de Ozônio, em kg NMVOC eq.	68
Tabela 9 - Impacto ambiental referente ao Esgotamento de Recursos Não-Biológicos, em kg SO ₂ eq.	70
Tabela 10 - Impacto ambiental referente à Acidificação Potencial, em mol H ⁺ eq.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

ALE-RO - Assembleia Legislativa de Rondônia

ANAVIDRO - Associação Nacional de Vidraçarias

AP - Acidificação Potencial

CO₂ - Dióxido De Carbono

CH₄ – Metano

CFC – Clorofluorcarboneto

DAP - Declaração Ambiental de Produto

DAP - Declaração Ambiental de Produto

DCO - Destruição da Camada de Ozônio

EMPA - Eidgenössische Materialprüfungs

EN – European Standard

EP - Eutrofização Potencial

EPD - Enviromental Product Declaration

ERB / ADP - Esgotamento de Recursos Biológicos

ETA - Estação de Tratamento de Água

EVA – Etileno Vinil Acetato

FFO / POCP - Formação Fotoquímica de Ozônio

GWP - Mudanças Climáticas

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

ISO - International Organization for Standardization

Kg - Quilogramas

kg CFC-11 eq - Quilogramas equivalente de Clorofluorcarboneto-11

kg CO₂ eq – Quilogramas equivalente de Dióxido de carbono

kg NMVOC eq – Quilogramas equivalente de Compostos Orgânicos Voláteis Não Metano

kg PO₄ eq - Quilogramas equivalente de Fosfato

kg Sb eq - Quilogramas equivalente de Antimônio

kW – Kilowatt

kWh – Kilowatt hora

LCA – Life Cycle Assesment

NBR - Norma Técnica Brasileira

NO_x – Óxido de Nitrogênio

MJ – Mega Joule

mol H⁺ eq – Mols equivalente de íons de hidrogênio

O₃ - Ozônio

PVB - Polivinil butiral

PVC - Policloreto De Vinilo

tCO₂e - Toneladas de dióxido de carbono equivalente

UV – Ultra Violeta

VUP - Vida útil de Projeto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivo Específico	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.1.1 FABRICAÇÃO DO VIDRO	23
2.2 FACHADA DE VIDRO	27
2.3 SISTEMAS DE FACHADA DE VIDRO	30
2.3.1 SISTEMA STICK	31
2.3.2 SISTEMA DE VIDRO ESTRUTURAL	32
2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE UMA FACHADA DE VIDRO.....	35
2.5 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	36
2.6 APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL38	
2.7 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DO VIDRO.....	40
3. METODOLOGIA	42
3.1 REVISÃO DE LITERATURA.....	42
3.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO	43
3.2.1 Sistema do produto e fronteiras deste sistema.....	44
3.2.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência.....	45
3.2.3 Alocação de fluxos e liberação	46
3.2.4 Fontes e requisitos de dados e qualidade.....	46
3.2.5 Software.....	48
3.3 OBJETO DE ESTUDO	49
3.4 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	51
3.4.1 Inventário dos recursos de produção	51
3.4.2 Inventário de energia	56
3.4.3 Inventário de água da beneficiadora	57
3.4.4 Inventário dos produtos de processamento e beneficiamento	58
3.4.5 Inventário de resíduos.....	59
3.4.6 Inventário do transporte da matéria-prima	59

3.5	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	59
3.5.1	Categoria e avaliação de impacto	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA	62
4.1.1	Impacto nas Mudanças Climáticas	63
4.1.2	Impacto na Eutrofização Potencial	65
4.1.3	Impacto na Destruição da Camada de Ozônio.....	67
4.1.4	Impacto na Formação Fotoquímica de Ozônio	68
4.1.5	Impacto no Esgotamento de Recursos Não-Biológicos	69
4.1.6	Impacto na Acidificação Potencial	71
4.1.7	Considerações para o transporte	72
4.1.8	Resultados gerais	73
5.	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos na história da construção civil e arquitetura, diversos conceitos construtivos foram adaptando-se a tecnologia e necessidades de uma geração. Sabe-se que a identidade de uma edificação e toda a modernidade atribuída a ela pode ser interpretada através de sua fachada, responsável também por fornecer a sua particularidade; além disso, conforme a passagem das décadas, a tendência a renovar e buscar tecnologias para a construção civil começou similarmente a ser atrelada à praticidade, redução de custos, eficiência e sustentabilidade. Assim, o material que levantou maior destaque após os anos 20 no âmbito construtivo foi o vidro, que representava a beleza, transparência e contemporaneidade da obra, além de propiciar as vantagens que o mercado demandava, como o desempenho acústico, térmico e energético (Pereira, 2022).

A utilização do vidro remonta há mais de 4 mil anos a.C. (Pinheiro, 2007), com evidências de que os antigos egípcios já produziam objetos envidraçados. No entanto, a produção em larga escala só ocorreu a partir do século I d.C., com o desenvolvimento de técnicas de sopro e moldagem. Inicialmente, o vidro foi utilizado para fabricação de objetos decorativos e janelas em edifícios religiosos e palácios, e a partir do século XX, houve avanços tecnológicos que permitiram a produção de grandes painéis envidraçados para fachadas de edifícios comerciais e residenciais.

Conseqüentemente, a partir da década de 60, a utilização de vidro nas fachadas começou a ser uma tendência cada vez mais comum na arquitetura brasileira, principalmente em grandes edifícios comerciais e residenciais, ofertando uma estética inovadora (Santos, 2013). Esta escolha estética beneficia não só da beleza e transparência do material, mas também da luz natural, do conforto térmico e da redução de energia consumida. No entanto, esta tendência criou a necessidade de avaliar a durabilidade e eficiência destas fachadas, uma vez que o vidro é um material que requer cuidados especiais para garantir a vida útil e manter as suas propriedades ao longo do tempo.

Neste quesito, com a ascensão do mercado construtivo e a técnica de inserção do vidro como material primordial aos fins estéticos, surgiu a preocupação com o impacto destas atividades humanas no meio ambiente, gerando um debate global nas últimas décadas sobre encontrar estratégias e aplicar conceitos de sustentabilidade para reduzir os impactos ambientais, além de buscar conciliar com a qualidade e durabilidade dos materiais. Assim, o setor da construção civil passou a dar maior visibilidade para a sustentabilidade, utilizando

como base de estudos a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que trata-se de uma abordagem sistemática e padronizada em escala global que possibilita a avaliação dos impactos ambientais de um produto, processo ou atividade por meio da identificação e mensuração das quantidades de energia e matéria utilizadas, desde a extração das matérias-primas que compõem o sistema até a sua disposição final (ABNT, 2009).

No cenário abordado, a ACV é empregada para avaliar o desempenho ambiental de construções, bem como investigar todas as atividades relacionadas ao ciclo de vida completo da edificação. Essa característica da metodologia faz dela uma ferramenta valiosa para apoiar a tomada de decisão dos diferentes agentes inclusos – sendo empresários, governo e sociedade – que visam prevenir impactos negativos ao meio ambiente, melhorar a eficiência dos sistemas e otimizar os processos de construção e operação das edificações (Rabaça, 2015).

Desta forma, seguindo a ideia de estudar o tipo de vidro que geralmente predomina nas fachadas envidraçadas na metodologia de sustentabilidade, em foco ao sistema *Structural Glazing*, prática construtiva e inovadora em crescimento no Brasil, a motivação deste trabalho consiste na sua Avaliação do Ciclo de Vida, desde a fabricação do vidro que a compõe até a sua disposição final. O objeto de estudo deste trabalho será o prédio do governo, a sede da casa de Leis de Rondônia, intitulada Assembléia Legislativa, localizada na cidade de Porto Velho, edificação esta que foi inaugurada no ano de 2019 e tem como destaque as fachadas envidraçadas em *Structural Glazing*.

1.1 OBJETIVO

Neste subcapítulo serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

O estudo teve como objetivo avaliar o ciclo de vida do vidro laminado empregado me fachadas do tipo *Structural Glazing*, utilizado em uma fachada de uma edificação em Porto Velho, empregando as normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009 como instrução da pesquisa.

1.1.2 Objetivo Específico

Para o objetivo geral deste trabalho acima, procurou-se distinguir entre objetivos específicos para melhor orientar a evolução das metodologias. Portanto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Utilizar revisões bibliográficas sobre o ciclo de vida do vidro laminado e aplicar no estudo de caso da construção civil;
- Analisar e categorizar os aspectos ambientais envolvidos no ciclo de vida do produto avaliado, durante a produção e etapa de beneficiamento, até a instalação para o usuário;
- Realizar a definição das fronteiras do sistema de produção do vidro laminado;
- Realizar o inventário para a avaliação do ciclo, envolvendo o seu processo produtivo;
- Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida do vidro laminado aplicado em fachadas do modelo *structural glazing*.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo da análise de ciclo de vida do vidro laminado aplicado em *Structural Glazing* tem uma ampla motivação para ser realizado. Primeiro, é importante destacar que todo trabalho acadêmico tem uma justificativa para sua elaboração, uma vez que pode contribuir em diversas áreas de conhecimento. Por meio desta análise do referido trabalho, é possível avaliar o impacto ambiental que essas fachadas podem causar ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, desde a extração das matérias-primas até o seu período de utilização.

É indispensável ressaltar que a Avaliação de Ciclo de Vida tem uma importante contribuição para a comunidade acadêmica. Isso se deve ao fato de que, atualmente, a preocupação com o meio ambiente tem se tornado cada vez mais latente, e métodos construtivos tecnológicos são diariamente inseridos no meio da engenharia, principalmente em relação à tipos de fachadas e os materiais que as compõem. Sendo assim, os estudos que buscam avaliar o impacto ambiental dos materiais utilizados em construções são fundamentais para o desenvolvimento de uma construção mais sustentável, principalmente no Brasil, onde diversas técnicas construtivas são exportadas para cá, mas não englobam estudos devidos sobre a viabilidade destes procedimentos no local de aplicação, ignorando também o impacto que podem gerar na sociedade. O trabalho também pode servir de base para futuros estudos mais aprofundados que a comunidade acadêmica possa vir a destrinchar interesse.

Outra importante contribuição do estudo da análise de ciclo de vida deste tipo de vidro é para os profissionais da área de engenharia civil ou similares. Com a avaliação do impacto

ambiental e conhecimento da trajetória do material desde o berço, é possível que os profissionais possam escolher os materiais mais adequados para cada tipo de projeto ou a aplicação correta do vidro, levantando mais estudos em consideração a sustentabilidade e a eficiência energética.

A contribuição ao meio ambiente também é uma importante justificativa para este estudo. A construção civil é uma das principais responsáveis pela geração de resíduos e pela emissão de gases poluentes. Dessa forma, o estudo desta ACV pode contribuir para a escolha de materiais mais sustentáveis e com menor impacto ambiental, reduzindo assim as consequências negativas da construção civil no meio ambiente.

Por fim, é importante destacar a contribuição para o governo. Esta análise pode auxiliar na elaboração de políticas públicas voltadas para a construção sustentável, seja incentivando a utilização deste tipo de fachada seguindo conceitos que respeitem e preservem o meio ambiente, ou até mesmo promovendo a utilização de materiais mais adequados e menos impactantes para a natureza. Além disso, este estudo pode colaborar para o estabelecimento de padrões de qualidade, contribuindo para o desenvolvimento de uma construção responsável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

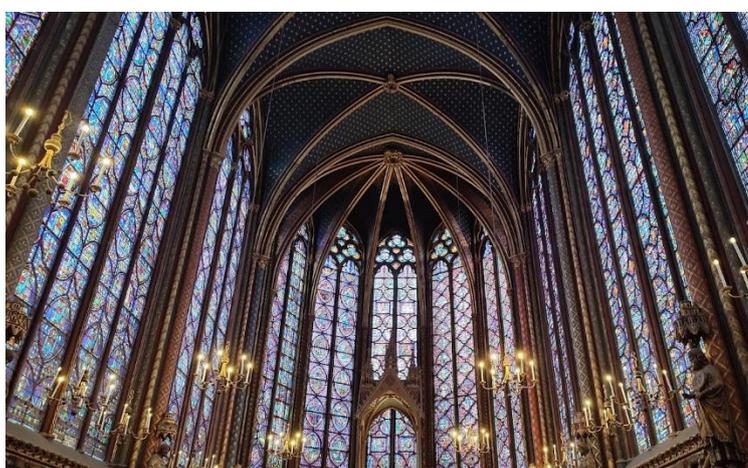
Para que seja possível realizar uma análise completa sobre o ciclo de vida do vidro laminado de fachadas de vidro estrutural (conhecidas mundo a fora como *structural glazing*), é necessário um embasamento teórico e explicativo sobre cada elemento que contempla este conteúdo.

2.1 VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O vidro é um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades estéticas, funcionais e de segurança. Sua evolução ao longo dos anos se deu por meio de avanços tecnológicos que permitiram a produção de vidros mais resistentes e com diferentes características, possibilitando novas aplicações na construção civil.

Na história, sabe-se que os primeiros registros de uso do vidro foram localizados no Egito e Mesopotâmia, há cerca de aproximadamente 500 e 400 anos a.C., onde eram feitas suas primeiras aplicações, não ainda como o material de construção que conhecemos e utilizamos demasiadamente até os dias de hoje, mas como um tipo de adorno para joias e vasos decorativos (Schittich, *et al.*, 2007). Posteriormente, por volta dos anos 100 a.C., com a evolução da sociedade e técnicas construtivas, o vidro foi descoberto como um potencial elemento de manuseio e funcionalidade para as obras civis, assim que inventada a técnica de sopro (utilizada na fabricação de vidro oco, como: garrafas, bulbos, taças, etc.) e para planificação do vidro, sendo esta última logo em seguida finalmente aplicada em edificações, como catedrais – por exemplo a Catedral de *Saint Chapelle*, em Paris, figura 1 –, igrejas, e residências da nobreza com vitrais (Pereira S. M., 2012).

Figura 1 - Catedral de *Saint Chapelle*, Paris, um dos maiores exemplos do início de utilização do vidro como adorno arquitetônico e na construção civil.



Fonte: (Ricaldes, 2020)

Após tantos progressos registrados no século 19, Schittich *et al.* (2007) expuseram sobre como o acesso foi facilitado à matéria-prima por novos métodos de fundição e corte, além de passar por uma popularização através da eficiência produtiva. Apresentou-se, assim, ao mundo, como era abrangente e apolíneo o uso do vidro em construções. Já no início do século 20, surgiram novas tecnologias de produção de vidros, como o vidro laminado e o vidro temperado, que aumentaram a segurança do material na construção civil.

Segundo Pinheiro (2007), em termos práticos para a sociedade, no início, o vidro deveria apenas deixar passar luz natural e proteger a edificação das possíveis intempéries. Os grandes avanços tecnológicos dos últimos anos permitiram que o vidro desempenhasse um papel importante na arquitetura moderna, combinando sua propriedade primária de transparência com outras propriedades, como o isolamento acústico, controle de calor, proteção contra riscos de lesões, proteção UV, proteção balística, proteção contra incêndio e até decoração de interiores, expandido até o conceito estrutural. Santos (2013) afirma que é notória a evolução do vidro na área estrutural, influenciando novidades e soluções inovadoras do seu uso em projetos arquitetônicos.

Pereira (2012) cita que, devido à necessidade de incluir a utilização do vidro em todos os setores construtivos, pós-tratamentos foram desenvolvidos nas últimas décadas para tornar o vidro mais resistente e até ser capaz de torná-lo uma parte de um elemento estrutural. Paralelamente, o desenvolvimento de métodos de fixação e estruturas de suporte mais enxutas e inovadoras tem permitido a construção de estruturas mais versáteis e seguras.

Outrossim, o estereótipo de construções vítreas serem frágeis e incapazes de apresentarem valores estruturais tornou-se obsoleto, uma vez que na contemporaneidade conhecemos obras turísticas capazes de suportar grandes movimentações em cima de placas de vidro, como é o caso da maior plataforma de vidro do mundo, *SkyGlass*, localizada no Brasil, em Canela (figura 2), onde a atração contempla peças de aproximadamente 43mm de espessura e placas temperadas e laminadas com espaçador de segurança. Assim, cada metro quadrado do piso de vidro pode suportar uma carga vertical de até 500 kg/m² e uma pressão do vento de até 220 km/h (Souto, 2021).

Figura 2 - SkyGlass Canela: uma das maiores plataformas de vidro no mundo, localizada no Brasil.



Fonte: (Morais, 2021)

Com o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais avançadas, como vidros autolimpantes e vidros inteligentes, a utilização do vidro na construção civil tende a se expandir sempre (SAINT-GOBAIN, 2000). Na atualidade, o vidro já é um material amplamente utilizado na construção civil em diferentes formas e aplicações, desde janelas e portas até fachadas inteiras de edifícios. As tecnologias crescentes em fachadas são o foco principal da evolução em obras civis, pois podem ser aplicadas em edifícios comerciais, residenciais e públicos, podendo variar em tamanho, forma e complexidade de *design*.

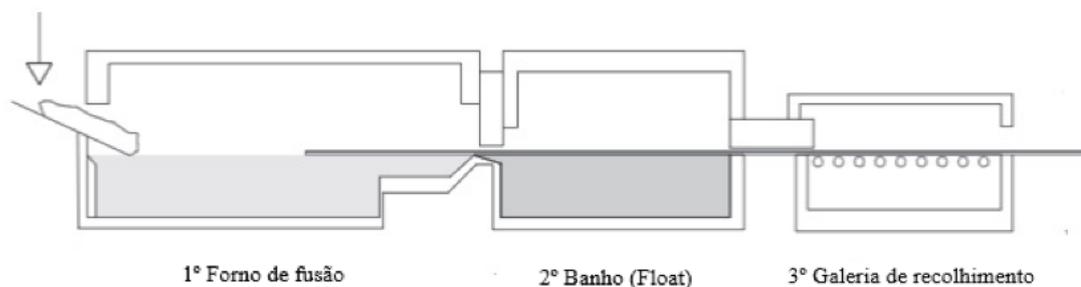
2.1.1 FABRICAÇÃO DO VIDRO

Como é conhecido através das literaturas, o vidro é uma substância amorfa, inorgânica e homogênea. Estas características são alcançadas em seu processo de fabricação, dadas pelo resfriamento de uma massa em estado líquido (Pinheiro, 2007). É importante ressaltar que existem diversas formas e tipos, cada um com suas próprias propriedades e processos de fabricação; desta forma, com o avanço da tecnologia, surgiram vários tipos de vidro, proporcionando uma melhor adaptação e utilização do material em diferentes contextos (Silva, 2017). A evolução dos processos de fabricação permitiu a criação de vidros com diferentes propriedades, como maior resistência, transparência, isolamento térmico e acústico, que são vantajosas para diferentes aplicações.

Para o contexto da construção civil, os tipos de vidros mais fabricados são o vidro *float* e o vidro estirado. Contudo, é possível obter uma diversidade infinita de produtos através de variações no processo de fabricação ou pelo beneficiamento do vidro após a produção. Além disso, também se utiliza de forma exacerbada os tipos de vidro laminado, temperado e insulado, que atuam em maior escala nas edificações brasileiras. Schittich *et al.* (2007) deixa claro que a

vidraça tipo *float* é a mais aplicada para janelas e fachadas de edifícios, conseqüentemente também o tipo mais produzido no mercado. Seu processo de fabricação é exemplificado pela figura abaixo:

Figura 3 – Processo de fabricação do vidro *float*



Fonte: Adaptado de Schittich *et al.* (2007)

O processo de fabricação do vidro float é complexo e altamente controlado, geralmente começando com a mistura de matérias-primas como areia, calcário, barrilha (carbonato de sódio) e feldspato, que são cuidadosamente pesadas e adicionadas a um forno aquecido a temperaturas extremamente elevadas, geralmente entre 1.400°C e 1.600°C (1º passo da figura 3). No forno, as matérias-primas são fundidas e misturadas em um estado líquido homogêneo (2º passo da figura 3), e em seguida, o vidro é vertido em um banho de estanho derretido para formar uma placa plana de vidro (3º passo da figura 3).

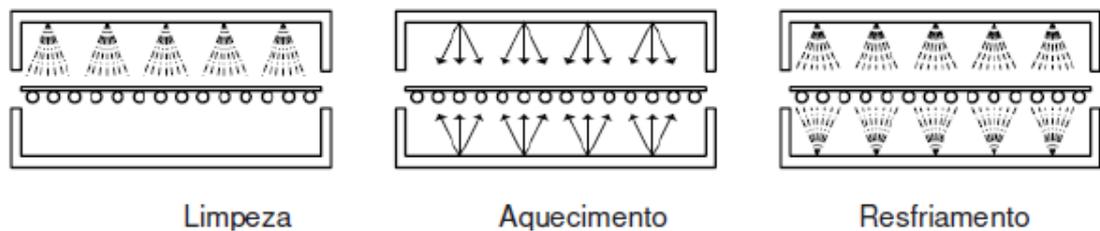
Ele é então submetido a um processo de recozimento, onde é aquecido a temperaturas mais baixas e lentamente resfriado para reduzir a tensão interna do vidro e melhorar sua resistência mecânica. Depois disso, o vidro pode ser cortado, perfurado e submetido a processos de beneficiamento, dependendo da sua aplicação final (Pinheiro, 2007).

Valarinho (2010) explica que, para utilização do vidro *float* na construção civil e nas circunstâncias estruturais, o material deve melhorar o desempenho mecânico, ambiental e estético, sendo necessário submetê-lo a diferentes tipos de tratamentos que podem modificar suas propriedades, tornando o vidro mais resistente a impactos e mudanças de temperatura, aumentando a sua segurança contra quebras, além de melhorar o seu desempenho acústico e térmico. Alguns dos tratamentos mais comuns incluem o vidro laminado, temperado, serigrafado, esmaltado e termo endurecido. Cada um desses processos confere ao vidro características específicas que o tornam mais adequado para diferentes tipos de aplicações na construção civil. Neste trabalho, serão abordadas as fabricações apenas acerca do vidro temperado, laminado e duplo.

2.1.1.1 Vidro Temperado

O vidro temperado vem para proporcionar características de resistência a tensões ao vidro *float*, e para que isso ocorra, ocorrem séries de etapas de tratamento. Primeiro, conforme explica Silva (2017), o vidro *float* passa pelo processo da têmpera, que consiste em aquecer a placa de vidro a uma temperatura em torno de 650°C e, em seguida, submetê-la a um resfriamento rápido com jatos de ar nas duas faces da placa. O procedimento é ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Processo de têmpera do vidro



Fonte: (Silva, 2017)

Esse processo é utilizado para aumentar a resistência mecânica do vidro e torná-lo mais seguro em caso de quebra, pois o vidro temperado se fragmenta em pequenos pedaços não cortantes, como ilustrado na figura abaixo.

Figura 5 – Comparação entre o vidro comum e o vidro temperado



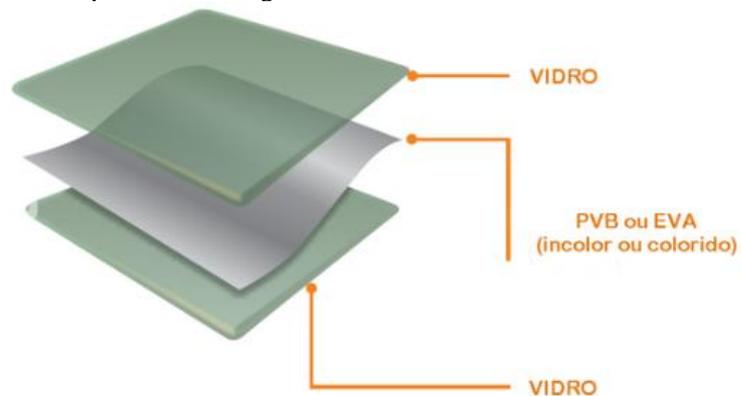
Fonte: (BLINDEX, 2013)

Como observado na figura 5, ao contrário do vidro comum, quando quebrado, o vidro temperado é fragmentado em pedaços pequenos e arredondados. Isso aumenta a segurança do produto e protege o usuário de ferimentos físicos. Essa característica é definida pela norma ABNT NBR 14698:2001. Apesar de apresentar uma resistência estrutural mais elevada, este não pode passar por modificações geométricas (Silva, 2017).

2.1.1.2 Vidro Laminado

Como é aclarado por Haldimann *et al.* (2008), o vidro laminado é composto por duas ou mais camadas de vidro unidas por filmes plásticos (geralmente é utilizado nas fábricas o Polivinil Butiral ou Etileno Vinil Acetato) através de um processo que envolve calor e pressão. Esse tipo de vidro é considerado seguro, pois, em caso de ruptura, a camada de ligação é capaz de reter os fragmentos, proporcionando maior proteção para as pessoas e melhor desempenho estrutural. Este tipo de vidro é comumente utilizado na indústria construtiva e automotiva.

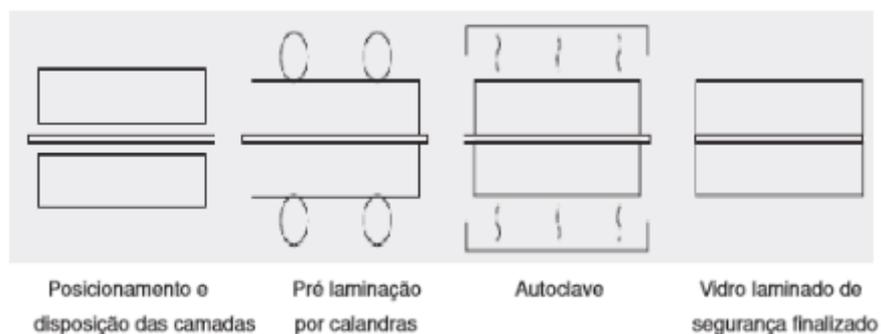
Figura 6 – Esquema de montagem do vidro laminado com PVB ou EVA



Fonte: (Bandeirantes, 2018)

Durante a fabricação do vidro laminado com o PVB, as placas de vidro são submetidas a uma lavagem e, em seguida, uma camada do filme plástico é aplicada entre as placas. Em seguida, os vidros são colocados em uma estufa aquecida a cerca de 300°C e depois prensados em uma calandra para pré-colagem (Pinheiro, 2007). Finalmente, o vidro é colocado em uma autoclave por cerca de seis horas a uma temperatura de cerca de 135°C e uma pressão de 12 barras. O processo pode ser observado na figura 7.

Figura 7 – Processo de fabricação do vidro laminado



Fonte: (Silva, 2017).

De maneira geral, o vidro laminado é amplamente utilizado na construção civil, principalmente devido ao seu desempenho após a quebra. Vale ressaltar que o vidro laminado temperado é frequentemente utilizado em aplicações estruturais, pois combina as características de ambos os vidros de segurança.

2.1.1.3 Vidro Duplo ou Insulado

De acordo com a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (ABRAVIDRO, 2018), o vidro duplo, conhecido como insulado, possui a função termoacústica e pode proporcionar isolamento térmico e acústico, sendo composto por pelo menos dois tipos de vidro, separados por uma camada interna de ar ou gás desidratado, que é selada duas vezes, sendo que a primeira selagem evita a troca gasosa e, a segunda faz com que haja uma estabilidade do conjunto (Silva, 2017).

Figura 8 – Esquema de montagem do vidro duplo



Fonte: (ANAVIDRO, 2013)

É possível combinar vidros de propriedades diferentes, como o temperado e o laminado, para obter qualidades distintas provenientes de cada tipo.

2.2 FACHADA DE VIDRO

Junto da industrialização na fabricação do vidro, esse material tornou-se amplamente utilizado em diversos tipos de construções, sendo comum em qualquer obra encontrar pelo menos uma janela com fechamento em vidro ou uma fachada chamativa com esta matéria prima (Caselli, 2011), e com este expresso desenvolvimento, isso levou à sua crescente presença em todos os locais do mundo, em diversas frentes de edifícios.

Na construção civil, o termo “fachada” é compreendido como uma barreira contra fatores agressivos externos, como luz solar, chuva, ruídos externos etc., também fornecendo diversas opções de material para revestimento, como: porcelanato, vidro, pedras naturais, cimento queimado, revestimento metálico ou até mesmo a pintura comum (Pereira, 2022).

Fachadas de vidro são sistemas de revestimento de edifícios que consistem em painéis de vidro fixados a uma estrutura de suporte. Esses painéis de vidro podem ser transparentes, translúcidos ou opacos, e podem ser usados para criar uma aparência moderna e elegante para o edifício (Cardoso; Carneiro, 2020). Elas também oferecem uma série de vantagens funcionais, podendo permitir que a luz natural entre no edifício, reduzindo a necessidade de iluminação artificial e, portanto, reduzindo os custos de energia. Além disso, os autores Cardoso & Carneiro (2020) enfatizam que este sistema pode ajudar a regular a temperatura do edifício, protegendo-o dos elementos externos e melhorando a eficiência energética geral, afinal, a maneira como um prédio é vedado do exterior está intimamente ligada ao seu desempenho.

Conforme o mercado da arquitetura e construção civil evoluem, técnicas como *structural glazing*, fachada *stick* ou fachada unitizada – todas elas sendo também conhecidas como “fachadas de pele de vidro”, por terem essa aparência de pele, de material unificado – crescem também. Este conceito de fachadas de vidro ocorre, como Santos (2013) descreve, quando a presença do vidro é predominante no exterior da edificação, sendo feito por quaisquer um dos métodos citados acima, dentre muitos existentes.

O termo para este tipo de fachada em pele de vidro foi introduzido ao mercado construtivo partir da década de 1980, lançado no mercado uma nova tecnologia de revestimento de edifícios. Cardoso & Carneiro (2020) afirmam que este método surgiu como uma evolução do sistema tradicional e originou o sistema *stick*. Esse avanço tecnológico teve como objetivo satisfazer a demanda dos arquitetos por uma fachada que privilegiasse o vidro como elemento de destaque.

O primeiro projeto no Brasil que utilizou o sistema de fachada unitizada do tipo *structural glazing* foi do edifício do *Citibank* na Avenida Paulista, em São Paulo, concluído em 1986 (figura 9).

Figura 9 – Prédio da *Citibank*, concluído em 1986, fachada em pele de vidro, na Avenida Paulista.



Fonte: (AFLALO, Citicorp Center, 2020)

Atualmente, existem diversas edificações que contemplam a técnica, como por exemplo a obra corporativa *Berrini One*, também em São Paulo (figura 10).

Figura 10 – Prédio da *Berrini One*, em pele de vidro, em São Paulo.



Fonte: (AFLALO, Berrini One, 2021)

O tipo de pele de vidro reconhecido como *structural glazing* é proveniente do sistema *stick* (Santos M. M., 2013), sendo que em um determinado estágio da popularização em fachadas envidraçadas, ocorreu uma mudança marcante na qual as antigas “fachadas cortinas” passaram a ser compostas por estes grandes panos de vidro sem perfis de alumínio visíveis do lado interno e externo do edifício. Os custos deste tipo de fachada costumam ser exorbitantes,

a ponto de ser vantajoso realizá-la apenas em edificações de grande porte, onde os valores seriam compensatórios.

2.3 SISTEMAS DE FACHADA DE VIDRO

A ideia para os projetos de fachadas unitizadas foi inspirada em um sistema amplamente utilizado em outras partes do mundo, conhecido como envelopamento de fachadas (Batista, 2013). Por ser uma técnica proveniente do âmbito internacional, quando aplicada ao Brasil, eram necessárias adaptações para atender às condições climáticas e às necessidades da arquitetura local, onde arquitetos e engenheiros buscavam soluções de abertura para permitir a ventilação e trabalhar conforto térmico.

Através dessa evolução, sabe-se que anterior ao sistema de fachada de envidraçamento estrutural, o setor construtivo conheceu diversas outras maneiras de se aplicar o vidro em exteriores. Ao longo dos anos, sistemas de montagem para execuções de vistas vítreas foram desenvolvidos até chegarem ao que conhecemos como a pele de vidro, exemplificados no quadro 1, proveniente dos dados do quadro de Arruda (2010). Os sistemas conhecidos e que se encontram no mercado, mesmo subdivididos entre os já vistos anteriormente, são o tipo Fachada Cortina, *Stick* e *Unit* (Tigre, 2016).

Quadro 1 - Sistemas de fachada de vidro ao longo do desenvolvimento construtivo

Sistema <i>Stick</i>	Pele de vidro – simples ou duplo
	Os quadros de vidros passam a ser aparafusados com presilhas, sobrepostos às colunas e travessas. Esses quadros são independentes e podem ser retirados. O sistema foi desenvolvido com o objetivo de reduzir a visibilidade dos perfis de alumínio na fachada do edifício. Com isso, a fachada passa a destacar mais os painéis de vidro, apesar de manter a marcação de linhas horizontais e verticais da caixilharia.
	<i>Structural Glazing</i>
	É a evolução da pele de vidro. Trata-se de um silicone estrutural utilizado para fixação dos painéis. A quantidade e espessura do silicone utilizado são determinadas de acordo com as pressões de vento positivas e negativas do local, altura do edifício e linha do perfil utilizado. As colunas e travessas ainda são contínuas e presas à estrutura e a montagem é feita manualmente com o uso de andaimes externos. Intempéries como sol extremo e chuva atrapalham a montagem.
Sistema Unitizado	Módulos unitizados
	A fachada é formada por painéis independentes estruturados com vidro, fixados por meio de ancoragens reguláveis. A fixação pode ser mecânica ou utilizar silicone. O sistema de montagem é mecanizado. É formado por colunas e travessas e dispensa a subestrutura para conter o vidro. Os painéis são totalmente pré-fabricados, o que aumenta o controle tecnológico e garante maior qualidade de fechamento à fachada.

Fonte: Adaptado de Arruda, 2010, p.21

É possível notar a subdivisão dos sistemas através da redução de esquadrias e necessidade de aumentar a impressão de uma fachada unitizada, funcionando como uma pele.

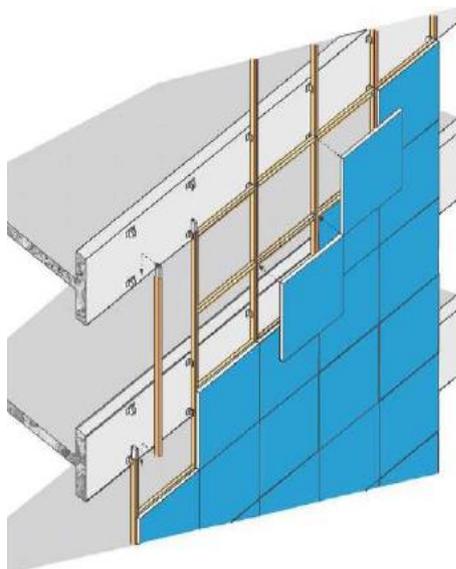
Serão verificados os tipos de sistema com base no que já foi estudado e construído ao longo dos anos, exceto pelo sistema unitizado, uma vez que o conhecimento deste não será previamente necessário para conferir informações ao tipo de fachada estudado neste trabalho.

2.3.1 SISTEMA STICK

Quando se aborda o tema das fachadas de tipo *stick*, por definição, sabe-se que o método do sistema consiste em um vidro que é colado com fita dupla face em alumínio, ou também o método onde suportes verticais com capacidade de suportar a pressão do vento ficam responsáveis por acomodar vedações montadas na frente da laje do edifício, exigindo cuidado no momento da colagem, devido à importância de evitar infiltração e delaminação da placa (Cardoso, 2017). A colagem por fita dupla face permanece em outros tipos de fachada, mesmo que no método de fachada *stick* essas fitas sejam fabricadas como espumas acrílicas.

No sistema de fachada *stick*, os perfis verticais e horizontais da estrutura são fixados na estrutura do edifício e os painéis de vidro são fixados individualmente nesses perfis utilizando uma variedade de clips, selantes e outros elementos de fixação. Este método de instalação tem esse nome porque as peças são montadas uma a uma, como se fossem bastões individuais. A fachada tipo *stick* é composta por dois módulos distintos: o colado, também conhecido como *glazing*, e o encaixilhado, chamado de pele de vidro. A decisão sobre qual modalidade utilizar depende da maneira como o vidro será instalado, embora os processos gerais de instalação sejam semelhantes em ambas as opções, como mencionado por Arruda (2010).

A instalação do material é feita utilizando andaimes, logo depois utilizando travessas para formação do esqueleto da estrutura, que é composto por perfis de alumínio e/ou aço. Esta disposição serve para o suporte dos painéis de vidro que ocuparão a vista do edifício, e eles são fixados à estrutura utilizando ancoragens e parafusos (Tigre, 2016). No momento de instalação dos vidros, os painéis encaixam-se nos perfis de suporte, um a um, e são finalmente fixados com grampos e abraçadeiras, posteriormente dando espaço à vedação das juntas e lacunas entre os painéis para evitar passagem de ar e água. O procedimento é apresentado na figura 11.

Figura 11 - Esquema de montagem do sistema *Stick*.

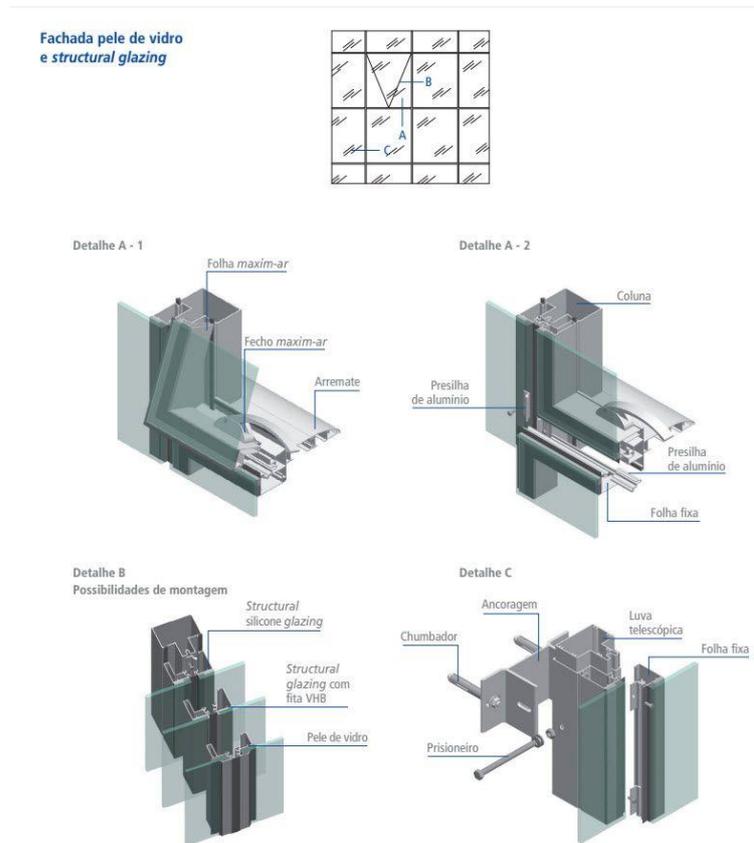
Fonte: (Santos, 2005).

É importante ressaltar que a instalação de uma fachada de vidro deste tipo deve ser realizada por profissionais qualificados e experientes, pois qualquer erro ou falha pode resultar em problemas graves, como vazamentos de água ou danos aos painéis de vidro.

2.3.2 SISTEMA DE VIDRO ESTRUTURAL

O tipo de sistema intitulado *Structural Glazing* (ou também vidro estrutural) faz uso do material *Structural Silicone Glazing*, que nada mais é que o silicone, derivado da sílica, aplicado na fachada para realizar as conexões entre os painéis de vidro e sua estrutura que suporta, além de resistir a intempéries (Silva, 2017). Diferentemente do método de fachadas *stick*, no sistema de fachada em *structural glazing*, os painéis de vidro são fixados diretamente à estrutura do edifício, geralmente perfis de alumínio, por meio de adesivos estruturais de alta resistência. Nesse caso, os painéis de vidro são fixados sem a necessidade de perfis verticais e horizontais, criando uma aparência mais limpa e minimalista, onde a estrutura metálica é mantida para o lado interno da edificação e não sendo possível ser vista pelo exterior (Rebuffo; Redaelli, 1995).

Figura 12 - Esquema de montagem do sistema *structural glazing*.



Fonte: (BELMETAL, 2017).

De acordo com Pereira (2012), sabe-se que este selante utilizado se torna um elemento estrutural que, além de ser útil para a vedação, também adere aos suportes e transfere as cargas da fachada para a estrutura metálica, garantindo a resistência à água. Sua elasticidade permite que o vidro se expanda e contraia sem gerar problemática, assegurando que as suas características iniciais possam permanecer da mesma forma ao longo dos anos. A transferência de carga que atua sob o silicone estrutural pode ser medida através de dados como: tamanho dos painéis de vidro, espessura, tipo de perfil e acabamento, cargas dinâmicas e o ângulo de inclinação que se encontra a superfície do vidro analisado (Figuerola, 2005).

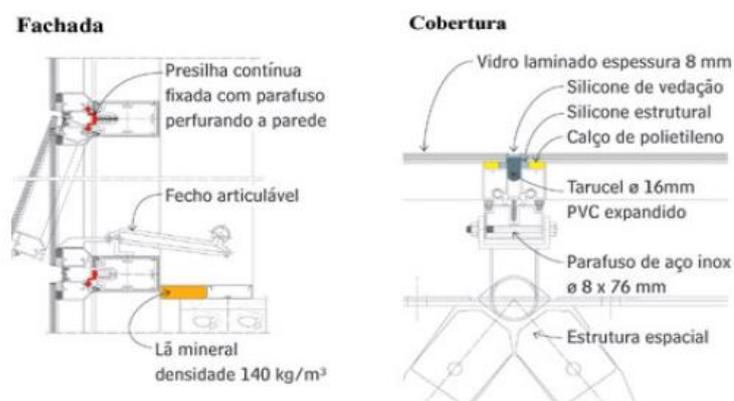
A adoção desse método de fachada requer uma análise detalhada dos materiais a serem empregados. No caso do vidro aplicado, empresas de renome, que desfrutam da fabricação desse material, compilam em seus catálogos as melhores alternativas para edifícios. O tipo de vidro mais comum no *Structural Glazing* é conhecido como *Durable Coated Glass*, ou em tradução livre, "vidro revestido durável". A fabricante, que contribuiu para projetos notáveis como o *Burj Khalifa*, nomeia essa variedade de vidro laminado modelo *Silver 20*. Este vidro de aparência reflexiva não apenas aprimora a eficiência energética da estrutura, mas também reflete o calor (GUARDIAN GLASS, 2023).

Conforme as informações apresentadas no catálogo eletrônico da Guardian Glass® (2023), esse tipo de vidro é submetido a um processo de revestimento, fortalecendo sua resistência contra arranhões, manchas e danos em geral. Tais revestimentos podem incluir óxidos metálicos ou polímeros, criando uma camada protetora. Amplamente empregado em janelas, portas, fachadas e outras aplicações arquitetônicas, o vidro revestido durável proporciona maior robustez e salvaguarda contra elementos externos.

Ademais, para a execução deste tipo de fachada, existe uma seleção de categoria de silicone a se adotar no momento da montagem. Tanto Santos (2013) quanto Pereira (2012) expõem a classificação de dois tipos de silicone: o silicone monocomponente e bicomponente. No primeiro caso, o processo de cura começa assim que o material entra em contato com o ar e a umidade, e sua duração depende da espessura deste silicone, sendo que as condições convenientes de aplicação são em temperatura ambiente e 50% de umidade relativa. Haldimann *et al.* (2008) explica que, dentro da sua geometria, a espessura ideal está entre 6mm e 20mm, onde a cura depende explicitamente deste detalhe, pois uma camada robusta pode acatar em uma cura malformada no interior, ou com cura completa estimada para até três semanas.

Já em relação ao segundo tipo de silicone, de dois componentes, o processo de secagem deste selante está relacionado com a reação entre ambos os componentes (90% base e 10% catalisador), pelo que se recomenda uma espessura mínima de 6 mm e uma largura máxima de 50 mm (Henriques, 2010). Este processo da secagem é avaliado em três dias, e isto é considerado uma vantagem em cima do silicone de um componente, justamente por ser capaz de disponibilizar maior velocidade e qualidade de execução.

Figura 13 - Esquema de montagem do sistema *structural glazing*, em vista de corte e planta baixa.



Fonte: (Figuerola, 2005).

Assim, acerca deste procedimento de montagem de fachadas, além da característica de seleção dos componentes para promoção de maior desempenho, existem outros aspectos que

podem prover vantagens e desvantagens para este tipo de fachada, estes que serão devidamente apresentados e discutidos neste trabalho.

2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE UMA FACHADA DE VIDRO

Dentro do contexto de fachadas unitizadas em vidro, no ramo da construção civil é possível identificar diversas vantagens e desvantagens na aplicação de determinados métodos construtivos. Fachadas envidraçadas distribuem elegância, praticidade e entrada de luz natural, além de informar aos observadores uma tecnologia aplicada na confecção daquele edifício. Sobre vantagens, apresentam-se os seguintes itens:

- **Tempo de execução reduzido:** os materiais necessários para execução de uma fachada de vidro são práticos, a maior parte já apresenta medidas de fábrica, servindo apenas para montagem *in loco*, onde um profissional habilitado para a função realizará a mão de obra. Estes materiais unitizados reduzem conseqüentemente até 70% do tempo gasto no canteiro (Batista, 2013, apud CONSULTORIA E ANÁLISE, 2013).
- **Qualidade aprimorada:** Como citado por Batista (2013), os materiais são recebidos diretamente da fábrica, sem atuação de intempéries por exposição excessiva nas obras, além de passar por rigorosos sistemas de fiscalização de qualidade.
- **Aparência:** A fachada de vidro pode proporcionar uma aparência moderna e elegante ao edifício, com linhas limpas e sem molduras visíveis (Caselli, 2011)
- **Redução em desperdício de materiais:** Há menos perda de material quando este é feito em um ambiente fabril, onde gerenciamento de materiais é mais eficiente do que em um canteiro de obras.
- **Resistência:** Silva (2017) afirma que a fachada pode ser mais resistente do que algumas opções, já que o vidro é fixado diretamente à estrutura do edifício e não depende de uma estrutura de suporte separada (em caso de vidro estrutural).
- **Redução de ruídos:** Este método é projetado para fornecer isolamento acústico e térmico, reduzindo a entrada de ruído externo e mantendo o interior do edifício fresco ou aquecido, dependendo das condições climáticas (Pereira, 2022).

Acerca das desvantagens, são poucas se em comparação aos benefícios apresentados anteriormente, mas a depender da escala da edificação, podem ser fatores de maior peso. São elas:

- **Economia:** A fachada de vidro estrutural pode ser mais cara do que outros tipos de fachada, devido ao custo do vidro e da necessidade de uma estrutura de suporte adequada para fixação do vidro. Seu custo pode se elevar cerca de 4,5 vezes mais que fachadas tradicionais (Batista, 2013).
- **Resistência:** Como citado nas vantagens, apesar de estruturalmente o vidro ter condições de se manter estável e até ultrapassar em qualidades de outros materiais, ele também pode não ser tão resistente a certos impactos quanto outros materiais de fachada, como concreto ou alvenaria (Silva, 2017). Pode também ser mais vulnerável a danos causados por condições climáticas extremas, como ventos fortes ou granizo.
- **Manutenção:** A manutenção da fachada de vidro estrutural pode ser mais complexa do que outros tipos de fachada, já que o vidro está diretamente fixado à estrutura do edifício e pode ser mais difícil de substituir ou reparar em caso de danos, além de exigir mão de obra especializada.
- **Conforto térmico x eficiência energética:** A fachada de vidro estrutural pode não ser apropriada para todos os tipos de edifícios, como aqueles que estão localizados em áreas com grande incidência de raios solares diretos, já que o vidro pode permitir a entrada de muito calor, o que pode aumentar a necessidade de resfriamento e aumentar o consumo de energia do edifício (Tigre, 2016). Outros métodos podem ser aplicados para reduzir a propagação de calor pelos vidros, como a utilização de vidros duplos (Pinheiro, 2007).

Além de prós e contras, também existem alguns problemas comuns após a execução deste tipo de fachada. De acordo com Cardoso (2017) e Batista (2013), a infiltração de água por utilização de material de baixa qualidade ou mão de obra não qualificada são contratempos recorrentes em obras envidraçadas.

2.5 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

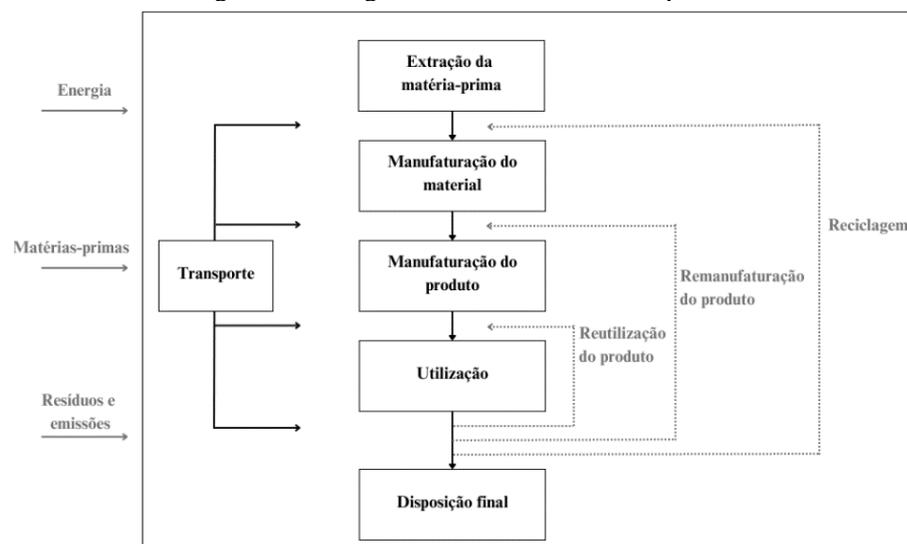
No contexto de prudência com o meio ambiente, existem diversos estudos acerca do que conhecemos como Avaliação de Ciclo de Vida. Este método é definido, de forma simplificada, como uma metodologia utilizada para avaliar os impactos ambientais associados a um produto ou processo ao longo de todo o seu ciclo de vida. Carvalho (2017) expõe que a ACV começou a ser estudada nos anos 90 como um possível debate dentro da sustentabilidade, onde buscava conscientização ambiental. Ainda assim, por sua metodologia altamente complexa, simplificações têm sido adotadas para facilitar a obtenção de dados e interpretação de muitos resultados. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), com a NBR (Norma

Brasileira) referente à ISO (*International Organization for Standardization*) de número 14040 (2009) – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, fica responsável por reger métodos e estudos acerca do tema.

A ACV busca essa conscientização para proteger o meio ambiente e ter informações de um determinado material desde a extração da matéria prima, fabricação e consumo até a disposição final dos resíduos (ABNT, 2009). A referida norma ainda deixa explícito que esta avaliação leva em consideração o uso de recursos naturais, a emissão de poluentes, a geração de resíduos e o consumo de energia em cada etapa do ciclo de vida do produto ou processo em questão. Dentro da construção civil, a ACV permite que os profissionais da engenharia avaliem e comparem diferentes opções de projeto, materiais e processos, identificando pontos críticos e oportunidades de melhoria ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo (Dalmora *et al.*, 2023). Desta forma, foi notório que, ao longo dos anos, houve um desenvolvimento com esta preocupação evoluindo a problemática ambiental, o que tem levado a um aumento no número de trabalhos relacionados à avaliação do ciclo de vida (Marcal *et al.*, 2013).

Assim, a avaliação leva em consideração a análise dos efeitos ambientais cumulativos de todas as fases do ciclo de vida de um produto, muitas vezes incluindo efeitos que não são considerados em análises mais tradicionais. A NBR 14040 (ABNT, 2009) expõe que a ACV deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. A figura 14, extraída do artigo de Librelotto e Jalali (2008), apresenta os estágios do ciclo de vida de um produto:

Figura 14 - Estágios do ciclo de vida de um produto



Fonte: (Librelotto, 2008).

Além da breve definição de uma ACV, ela também apresenta fases. A segunda fase de uma ACV é o Inventário do Ciclo de Vida (ICV), onde os dados de entrada ou saída são ligados ao sistema de estudo, e essencialmente consiste em uma coleta de dados indispensáveis para alcançar os objetivos traçados. Adiante, tem-se a terceira fase, que compreende a exposição de informações extras para auxiliar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, objetivando a compreensão da importância ambiental; esta fase é denominada Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (Bueno, 2014).

Estes tipos de avaliações, conforme explica NBR ISSO 14040 (ABNT, 2009), é uma das muitas técnicas de gestão ambiental, mas, para determinadas situações, pode não ser a técnica mais conveniente, sendo que a ACV geralmente não se concentra nos aspectos econômicos ou sociais de um produto, mas a abordagem do ciclo de vida e os métodos descritos na também podem ser aplicados a esses outros aspectos. O aspecto que dá enfoque a este trabalho é o impacto da construção civil no meio ambiente considerando seu ciclo de vida.

2.6 APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil é reconhecida por ser uma indústria altamente degradável, e seus impactos ambientais são visíveis em todas as etapas de sua cadeia produtiva, sendo responsável por grande parte dos recursos naturais extraídos, cerca de 15 a 50% (Laruccia, 2014). No que diz respeito à avaliação de sistemas construtivos, Bueno (2014) explica que são raras as ferramentas para avaliar de forma objetiva e holística o desempenho ambiental através da ACV, e um dos principais problemas na utilização deste método para a construção do sistema é a falta de dados de inventário disponíveis para a construção deste sistema no cenário brasileiro, tornando a aplicação da metodologia mais complexa e demorada.

A questão da sustentabilidade na indústria da construção civil é um assunto amplo, que engloba desde o planejamento inicial dos projetos, preparação do local, fabricação dos materiais, execução da obra, uso, até sua destruição, reciclagem, tratamento de resíduos e disposição final (Farias *et al.*, 2022). No que tange as consequências do mercado construtivo, as principais incluem emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar, do solo e da água, além de degradação de habitats naturais e da biodiversidade. Nesta conjuntura, são analisados diversos materiais que são comumente aplicados em edificações, como: cimento, argamassa, alvenaria, tintas e vernizes, madeira, laminados, considerando seu impacto na vida útil de

projeto (VUP) de edifícios (Librelotto; Jalali, 2008). De forma mais detalhada, os impactos citados por Librelotto e Jalali (2008) são, em uma ordem que segue o conceito do berço ao túmulo:

- Consumo de recursos naturais: onde ocorre degradação das áreas de extração concentradas e depauperamento destes recursos;
- Geração de resíduos: podem ocasionar nutrificação (nutrientes como nitrogênio e fósforo são introduzidos em um ecossistema aquático, levando ao crescimento excessivo de plantas e à eutrofização), isso pode prover tanto de resíduos sólidos quanto líquidos;
- Emissões aéreas: poluentes gerados pela fabricação e uso dos materiais, como CO₂, podem ocasionar chuva ácida ou efeito estufa;
- Consumo energético: fontes não renováveis (gás natural, combustíveis fósseis) são muito utilizados na produção de materiais construtivos;
- Produto final: manuseio indevido, abundância de embalagens, inconformidades normativas e entre outros fatores podem fazer com que o produto final seja um forte impasse na manutenção de um equilíbrio ambiental.

Portanto, sabe-se que o setor da construção civil necessita contribuir na redução destes impactos ambientais (Costa; Kos, 2021). A ACV não vê obras de engenharia, por exemplo, como produtos de baixa influência ambiental, uma vez que estes possuem longevidade, sofrem alterações e podem desempenhar diversas funções, deixando de ser uma análise simplória (Bueno, 2014).

A Avaliação de Ciclo de Vida, aplicada neste cenário, pode auxiliar a delimitar um sistema funcional nos métodos construtivos de um edifício. Por exemplo, Soares, Souza e Pereira (2004) ilustra que, conhecendo as etapas de ciclo de vida de uma obra, é possível destacar os processos de conversão de energia e materiais e extração de matéria-prima – que é necessária para diferentes fases do ciclo de vida da edificação; além disso, a etapa de construção propriamente dita, incluindo o transporte de materiais até a finalização da estrutura, tanto comercial quanto residencial, considerando também o momento em que possivelmente a estrutura está em desuso, renovação ou demolição.

Os elementos de estudo, em todo este caso, são os citados anteriormente: pisos, coberturas e demais acabamentos. Estes elementos, entrelaçados com a conceituação de sistemas construtivos e sistemas estruturais, criam uma ordem estimada de Tempo de Vida Útil,

que serve para compor análises comparativas entre edificações divergentes através da ACV, mas que possuem este mesmo embasamento na vida útil (Soares; Souza; Pereira, 2004). Tanto Costa e Kos (2021) quanto Soares, Souza e Pereira (2004) descrevem que, para uma maior praticidade no momento de seleção de um material para compor aquela obra, seria interessante dispor de um catálogo (como alguns já existentes *on-line*, como *Sima-pro* e *Umberto*) de diferentes materiais utilizados e/ou descartados na construção civil, disponibilizado em um banco de dados, este onde haveria um conjunto de informações a respeito destes insumos (como azulejos, tintas, argamassas, vidros), e assim, na execução de uma atividade, como uma fachada, seria possível realizar uma simulação a partir de diferentes cenários que atendam a um mesmo objetivo.

Existem diversos trabalhos que embasam a ACV dentro do setor construtivo, como estudos em estradas rodoviárias (Mroveh *et al.*, 2001), a pesquisa da *European Commission* (2004) que aplicava o método ao estudo em janelas emolduradas, PVC ou alumínio, ou Aktas e Bilec (2011), que estudaram a ligação entre o tempo de vida dos edifícios dentro do contexto da ACV, demonstrando que a VUP média das edificações residenciais nos Estados Unidos gira em cerca de 61 anos. Poucos autores embasaram sobre a ACV do vidro, ou até mesmo de fachadas envidraçadas, por isso, neste presente projeto, será aprofundado o estudo da Avaliação de Ciclo de Vida em um contexto de fachadas em pele de vidro.

2.7 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DO VIDRO

Dentre os elementos de construção de longa duração, destaca-se o vidro. De modo geral, sabe-se que este material é produzido a partir da combinação de matérias-primas inorgânicas naturais, como a sílica, barrilha e calcário. Contudo, as proporções individuais desses componentes podem ser ajustadas para modificar algumas propriedades específicas, como o índice de refração, cor e viscosidade, e essas propriedades variam dependendo da finalidade do vidro, já que existem diferentes tipos e aplicações possíveis (UFSC, 2016).

Nota-se, também, que o maior emprego do vidro nos setores construtivos é evidente principalmente em janelas, que possuem a tarefa complexa de atender diversas demandas distintas: proporcionar isolamento térmico, aproveitamento da luz solar, entrada de luz natural, evitar o superaquecimento, isolar contra ruídos, garantir a privacidade e segurança dos ocupantes. Ainda, é importante destacar que a janela exerce grande influência no consumo de energia do edifício e na qualidade do conforto térmico e visual (Citherlet; Guglielmo; Gay, 2000). Nesse sentido, uma abordagem integrada que contemple a Avaliação do Ciclo de Vida

do sistema de envidraçamento oferece uma visão mais abrangente e precisa para estimar o desempenho de sistemas avançados de envidraçamento do ponto de vista ambiental e econômico.

Os resultados de uma Avaliação do Ciclo de Vida são influenciados pelas suposições e pelo escopo do sistema. A distância de transporte, quebra e perda durante um processo ou intervalo de tempo de manutenção também são fatores determinantes. Como citado anteriormente, existem poucos estudos em cima da ACV de vidros, sendo que um dos trabalhos mais reconhecidos de referência nesta área é a elaboração de doutorado de Brugnera (2018), onde foi realizado um estudo comparativo entre dois tipos de fachadas: a fachada cortina, que é totalmente envidraçada, e a fachada tradicional, que é composta por uma parede de alvenaria e esquadrias com vidro. O estudo analisou os materiais empregados, o tamanho da janela, o tipo de vidro utilizado, a presença ou ausência de dispositivos de sombreamento, bem como a forma como a combinação dessas características impactou no consumo de energia do edifício – o qual era o foco do projeto da autora.

Assim, neste trabalho, serão explorados os mecanismos para buscar uma avaliação completa do ciclo de vida do vidro, visando além apenas do material em itens do dia a dia, mas sim com sua aplicação em sistemas de fachadas envidraçadas.

3. METODOLOGIA

Buscando atingir os objetivos propostos e iniciar a execução da pesquisa, a metodologia abordada para este trabalho foi dividida entre alguns procedimentos.

3.1 REVISÃO DE LITERATURA

Para obter os resultados acerca da Avaliação de Ciclo de Vida dos vidros que compõem as fachadas envidraçadas no método *Structural Glazing*, como descrito no início deste trabalho, a primeira fase deste estudo consistiu na revisão da literatura, abrangendo todos os tópicos essenciais para o embasamento teórico necessário ao desenvolvimento da pesquisa proposta. Foram explorados conceitos e definições metodológicas da Avaliação do Ciclo de Vida e sua aplicabilidade na avaliação do desempenho ambiental de componentes construtivos, focando especificamente na ACV de fachadas envidraçadas, por mais que não exista um número considerável de teses que abordem sobre o tema específico.

A revisão da literatura priorizou a análise de documentos normativos, como a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009), que fornecem diretrizes metodológicas para a ACV. Além disso, foi realizado um estudo exploratório das suas principais aplicabilidades em diversas áreas, abrangendo desde estudos com foco na avaliação do ciclo de vida de alimentos, até materiais de construção, a fim de compreender suas potencialidades e limitações para aplicação.

Também foram considerados estudos nacionais e internacionais, bem como trabalhos científicos relevantes sobre o tema. Desta forma, foi possível realizar uma comparação entre a análise do ciclo de vida de uma fachada envidraçada e de uma edificação habitacional com características semelhantes, por exemplo, como a tese de Vargas (2021), que media o desempenho ambiental de uma determinada edificação através da ACV avaliando duas composições de vedações externas.

Baseada nas normas ISO 14040 (Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura) e 14044 (Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Diretrizes), a prática seguiu 4 etapas: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos; interpretação

A primeira etapa de qualquer avaliação do ciclo de vida consiste na definição do objetivo e escopo e tem como propósito orientar a definição deste escopo, sendo capaz de praticar um controle de qualidade mais adequado. Na segunda etapa, foi feita a coleta de dados sobre os materiais, fábrica responsável pela confecção do material e transportadora que se encarregava

do manuseio até o beneficiamento, além de análise de efeitos no meio ambiente, seguindo procedimentos de cálculos que tiveram como objetivo quantificar as entradas e saídas de insumos, energia e trabalho. Essas informações foram encontradas em bancos de dados e entrevistas às empresas envolvidas no estudo.

Na próxima etapa, foi feita a avaliação dos impactos relativos aos dados coletados na fase anterior a fim de concluir sobre a importância dos impactos ambientais potenciais. Nessa etapa é que foram realizadas as classificações, caracterização, normalização, agrupamento, ponderação e interpretação dos resultados.

E, por fim, a quarta etapa conteve a interpretação onde as demais fases foram consideradas coletivamente e, assim, combinando as conclusões retiradas da análise do inventário e da avaliação de impacto, com objetivo e escopo definidos, alcançando os resultados e recomendações.

O trabalho também buscou abordar a relação entre poluição na produção e pós produção do material, além dos impactos gerados na instalação dos tipos de vidro; com isso, o estudo foi capaz de realizar um levantamento de quais o impactos ambientais presentes na confecção e instalação deste tipo de obra. Diversos estudos como de Guglielmo & Gay (2000), Brugnera (2019) e Farias *et al.* (2022) baseiam-se em sistemas de ACV e são potenciais de comparação, uma vez que, utilizando estas e outras literaturas como base, para trabalhos futuros, é possível contribuir os conhecimentos sobre o tema e gerar uma repercussão sobre as consequências nas escolhas de determinados materiais para elaboração de fachadas.

3.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo do projeto foi apresentado ao início deste trabalho, mas metodologicamente o contexto de propósito para esta etapa da pesquisa nada mais é que a Avaliação do Ciclo de Vida do vidro laminado tipo *Silver 20 On Clear* que compõe uma fachada contruída com vidro estrutural em uma edificação em Porto Velho - RO. Os subtópicos que ficarão responsáveis por reger o escopo do trabalho foram baseados na NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), onde a seguinte definição aparece: “o escopo seja suficientemente bem definido para assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo declarado” (ABNT, 2009). Desta forma, o trabalho buscará sequenciar de forma lógica o processo para o entendimento da ACV do material estudado, lidando com o curso dos tópicos de: sistema do produto, fronteira do sistema, função do sistema, unidade

funcional, procedimentos de alocação, requisitos de dados, categoria e avaliação de impacto, pressupostos, limitações, requisitos iniciais e formato do relatório.

Além disso, estava sendo estudada a possibilidade de utilização do *software* SimaPro®, desenvolvido pela empresa *Pré Sustainability*, reconhecido por ser o *software* mais utilizado para ACV, com função de coletar dados e analisar o desempenho ambiental de determinados produtos e serviços. No entanto, com a impossibilidade de aquisição do *software* através de vínculo universitário, foram necessários outros estudos em cima de empresas do exterior que apresentassem um *Environmental Product Declaration* (EPD) ou, traduzido, Declaração Ambiental de Produto (DAP), que nada mais é que o estudo de ciclo de vida daquele produto – e no caso deste trabalho, empresas as quais aplicavam esses estudos a vidros laminados. Com este EPD, foram realizadas revisões bibliográficas para métodos de comparação entre a ACV das diferentes empresas e utilizando a norma Europeia, EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 - *Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products*.

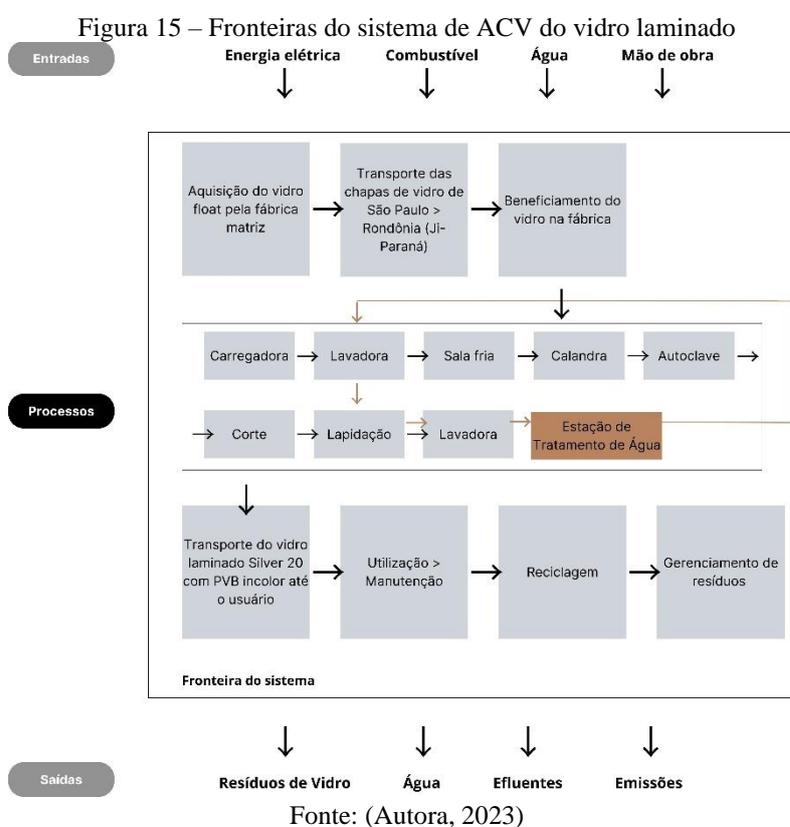
3.2.1 Sistema do produto e fronteiras deste sistema

A delimitação precisa do sistema de produto foi determinada a partir das informações disponíveis fornecidas tanto pela empresa fabricante, intitulada Guardian Glass®, que está localizada na cidade de Campinas, no estado de São Paulo, quanto pelo fornecedor de materiais processados e responsável pelo beneficiamento das chapas, situada no município de Ji-Paraná, estado de Rondônia, intitulada Mirandex Vidros®. No entanto, é essencial destacar que grande parte dessas informações sobre a fabricação estava restrita devido a considerações de confidencialidade ou inacessibilidade por parte do solicitante. Nesse contexto, a abrangência do sistema foi estrategicamente definida para englobar desde a fase inicial do transporte das chapas de vidro já preparadas até a fase subsequente de conversão e beneficiamento do vidro *float* em vidro laminado, culminando no transporte do produto finalizado ao cliente. Porém, é importante ressaltar que a fase de disposição final foi deliberadamente excluída em termos quantitativos desse escopo, a menos que esteja vista e relacionada com processos de reciclagem dentro da própria empresa de beneficiamento.

É válido mencionar que elementos como a fabricação de maquinários e a produção e transporte de materiais de embalagem não foram considerados dentro dos limites do sistema. Por outro lado, componentes como a produção de combustíveis, materiais auxiliares, energia elétrica e o transporte dos produtos acabados foram criteriosamente contemplados e analisados.

Embora as etapas fundamentais do processo de fabricação do vidro em si sejam conhecidas e serão apresentadas em detalhes neste estudo, as informações quantitativas relacionadas a essas etapas não foram compartilhadas em profundidade, inviabilizando uma análise abrangente do ciclo de vida nesses aspectos específicos.

Portanto, as entradas e saídas predominantes no escopo deste estudo se baseiam, em sua maioria, nas etapas posteriores de processamento e beneficiamento do material, as quais foram minuciosamente avaliadas para proporcionar uma compreensão do ciclo de vida das fachadas envidraçadas do sistema *Structural Glazing*.



3.2.2 Função, unidade funcional e fluxo de referência

Para o estudo, na função de proteção de uma edificação através de fachadas, será estudado o tipo de vidro laminado *On Clear* com PVB Incolor. Sua quantificação se dá em chapas de 2,40 m x 3,21 m, transportado da fábrica matriz para a empresa de beneficiamento Mirandex Vidros®, a unidade que será adotada de modo funcional e que compõe o fluxo de estudo da ACV será de 1m² quadrado de chapas de vidro de 4mm, sendo que a beneficiadora produz mensalmente 4.000m². Neste caso, como as lâminas de vidro chegam sem

beneficiamento na fábrica e ainda passarão pelo processo de se tornarem laminados (com duas chapas de vidro e uma camada de PVB entre eles), no fim, o quantitativo de vidro tipo laminado *On Clear* é de 2.000m² com aproximadamente 9mm em produção mensal. Assim, realizando a proporção da produção do mês, foi possível converter os gastos para uma metodologia simplificada em 1m² de chapa de vidro, permitindo futuros estudos que comportem uma maior quantidade de material vítreo.

Para o estudo de caso em específico, foi feito o levantamento de quantidade total aplicada na obra da Assembleia Legislativa de Rondônia, considerando também o quantitativo aplicado com posteriores manutenções de peças vítreas danificadas.

3.2.3 Alocação de fluxos e liberação

Dentro dos processos industriais, é inusual obter apenas um tipo de saída, assim como também é pouco comum seguir uma relação linear onde a quantidade de matérias-primas utilizadas resulta diretamente na quantidade de produtos gerados (ABNT, 2009). A maioria dos processos industriais tem a capacidade de gerar uma variedade de produtos, muitos dos quais podem encontrar novos propósitos como matérias-primas, seja em estágios intermediários da produção ou mesmo após serem descartados. Esta divisão de fluxos, tanto de entrada como saída, foram representadas neste trabalho através do fluxograma exposto na figura 15, onde os impactos da criação e fabricação primária do vidro foram alocados no seu processo de beneficiamento, e posteriormente as outras etapas dentro desta benfeitoria foram quantificados em unidades e separados por seção.

3.2.4 Fontes e requisitos de dados e qualidade

No processo de compilação de informações para o inventário do ciclo de vida, foi dada prioridade à utilização de dados provenientes do âmbito nacional e estadual, extraindo dados internacionais apenas para método comparativo entre impactos ambientais, sendo que a abordagem inicial buscava a incorporação dos dados fornecidos pela empresa que concedeu o vidro para o objeto em estudo. Essa seleção metodológica foi intencionalmente moldada para incorporar um cenário abrangente e representativo, assegurando que os dados refletissem a realidade contextual da pesquisa. No entanto, como a maior parte dos dados como: gasto energético em kW/m² vidro e gasto de água foram calculados de forma empírica e sem comprovativos documentados, a confiabilidade pode ser considerada média.

É importante destacar que, inicialmente, a intenção primordial consistiu em aproveitar as informações disponibilizadas pela empresa que desempenhou o fornecimento de vidro para o escopo do estudo. No entanto, como mencionado anteriormente, as restrições temporais referentes à pesquisa limitaram o âmbito da coleta de dados primários, restringindo-a exclusivamente à documentação e base de dados externos, junto às etapas de beneficiamento, acabamento e o subsequente transporte para o local de utilização. Nas outras fases do processo, foi feita a incorporação de dados secundários, sendo que tais informações secundárias se limitava àquelas que estavam disponíveis a partir de fontes confiáveis e reconhecidas, tais como as fontes de dados oficiais. É relevante ressaltar que essa estratégia se traduziu em um compromisso com a qualidade e validade dos dados empregados, alinhando-se assim ao rigor metodológico da Avaliação do Ciclo de Vida.

Para cada uma das etapas analisadas nesse contexto de ACV, a fonte de cada conjunto de dados e as metodologias adotadas para sua coleta e incorporação foram descritas e delineadas por um funcionário interno da empresa Mirandex Vidros©, contribuindo para a transparência, confiabilidade e solidez do processo de análise e avaliação do ciclo de vida do tipo de vidro para fachadas envidraçadas em *Structural Glazing*.

Os dados obtidos para moldar o estudo foram todos adquiridos através de visitas técnicas, entrevistas aos técnicos e chefes de produção e folhetos informativos oficiais do fabricante referentes a empresa Mirandex Vidros©, de matriz em Ji-Paraná – RO. Com acompanhamento do coordenador de produção das chapas de vidro, as visitas realizadas demonstravam, para tratamento das chapas de vidro *float* em vidro laminado, as seguintes etapas:

- Recebimento da matéria prima: Placas de vidro são adquiridas de unidades produtoras no Rio de Janeiro e São Paulo, com variações em espessura, tamanho e tonalidade, incluindo vidros refletivos e fumê.
- Carregadora: Dispositivo responsável por organizar as placas para a sala fria.
- Lavadora: Máquina encarregada de limpar e secar placas antes da laminação.
- Sala fria: Na câmara fechada com temperatura e umidade reguladas, para prevenir a entrada de impurezas, ocorre o processo de união das chapas de vidro através do uso do PVB, resina que é utilizada para unir as duas placas que possui claridade óptica e flexibilidade.

- Calandra: Saindo da câmara fria e submetido a um primeiro forno, onde a película PVB é aquecida para a primeira fixação às placas de vidro.
- Auto Clave: Responsável pelo aquecimento e pressão para aderência completa do PVB.
- Corte: As placas são colocadas sobre uma superfície para a execução dos cortes conforme o projeto, onde as chapas são cortadas com diamantes e corte quente da película.
- Lapidação: Técnica para eliminar arestas e aumentar resistência.
- Lavadora: Novamente, as peças são lavadas, secas e inspecionadas minuciosamente com luz artificial.

Todas as entradas e saídas conforme materiais gastos em cada etapa foram quantificados, através dos dados exclusivos fornecidos pela empresa Mirandex Vidros©. No entanto, a empresa não possuía controle e quantificação de emissão de efluentes e outros impactos ambientais, levando este estudo a buscar referências de inventário para a avaliação de impactos em trabalhos de empresas externas, em principal de origem Europeia, onde se tem uma maior riqueza de detalhes e estudos de ciclo de vida disponíveis para acesso público.

3.2.5 Software

Neste estudo, foi utilizado o *software Open LCA 2.0*, desenvolvido pela empresa GreenDelta GmbH, para fins de análise. O *software* é uma ferramenta que atende aos requisitos estabelecidos pelas normas ISO 14040 e 14044 e é amplamente empregado para a realização de ACV. O *Open LCA* oferece acesso a um banco de dados que é essencial para a compilação do inventário e que é adquirido através do *Open LCA Nexus*, um site com diversos bancos de dados que apresenta estudos gratuitos e também pagos de emissões e efluentes.

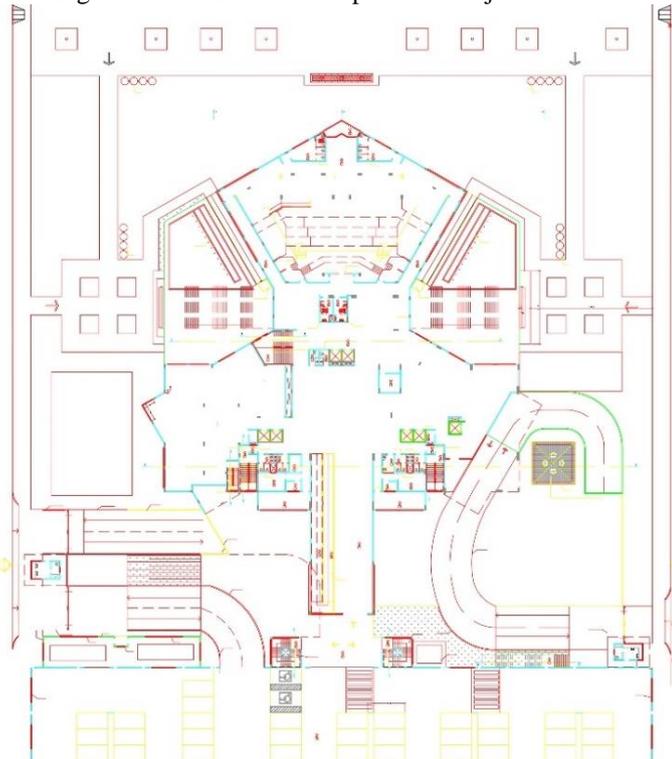
Para este trabalho, no tópico de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida, optou-se por utilizar o banco de dados *EcoInvent 3.7*, que trata-se de um banco de dados que é uma extensa biblioteca de inventários que contém informações sobre as cargas ambientais associadas ao ciclo de vida de uma ampla variedade de produtos, processos e sistemas, abrangendo desde energia até transporte e gestão de resíduos. O *EcoInvent 3.7* foi inicialmente desenvolvido em 2003 em colaboração com o Instituto Federal Suíço de Pesquisa e Testes de Materiais (em alemão, a sigla é EMPA - *Eidgenössische Materialprüfungs*) e diversos órgãos governamentais suíços. A escolha desse banco de dados foi motivada pela sua compatibilidade com os componentes específicos abordados neste estudo.

Durante o levantamento do inventário na ACV, onde as entradas e saídas foram quantificadas, uma variedade de bancos de dados de empresas renomadas no setor de vidro laminado foi empregada. Estes incluíram informações fornecidas pelas empresas NSG Group - Pilkington Group Limited (2019), Şişecam Turkey (2022), Ift Rosenheim GmbH (2017) e Laurier Glass Ltd. (2018). Além disso, o banco de dados da *Nexus*, denominado OzLCI 2019, que contém uma extensa compilação de informações a respeito do vidro laminado de 8,4mm, foi igualmente utilizado. Foi constatado que dentro do programa não foram identificados bancos de dados que empregassem referências brasileiras, o que, por conseguinte, dificultou a obtenção de resultados mais alinhados com a realidade local, um desafio enfrentado durante a execução deste estudo de caso. O *OpenLCA* oferece uma gama diversificada de funcionalidades, incluindo a capacidade de comparar os modelos desenvolvidos neste estudo com modelos já existentes, promovendo assim a partilha de dados e o compartilhamento de conhecimento entre os utilizadores, ampliando as possibilidades de análise e pesquisa.

3.3 OBJETO DE ESTUDO

A próxima fase foi determinada pela definição do objeto de estudo. O projeto selecionado para esta dissertação é o prédio do governo, a sede da casa de Leis de Rondônia, intitulada Assembléia Legislativa, localizada na cidade de Porto Velho, edificação inaugurada no ano de 2019 e tem como destaque as fachadas envidraçadas em *Structural Glazing*. A fachada e sua tipologia será analisada com foco na Avaliação do Ciclo de Vida.

Figura 16 - Planta baixa do prédio de objeto de estudo



Fonte: (Autora, 2023)

Conforme observado na figura 16, existem faces específicas do prédio onde estão localizadas as janelas de tipo *structural glazing*, com aplicação do vidro laminado. Isso pode ser constatado com maior precisão nas fotografias recentes retiradas da edificação.

Figura 17 – Fotografia do prédio de estudo



Fonte: (Autora, 2023).

Também abordaram-se informações através da coleta de documentos técnicos da edificação, sendo possível investigar a fábrica que ficou responsável pela confecção dos vidros

e esquadrias, além da transportadora responsável e período que perdurou a instalação do material, ainda descobrindo as perdas de material no processo. Todo esse estudo serviu para averiguar as consequências geradas durante o seu ciclo de vida.

3.4 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Os detalhes cruciais do inventário do ciclo de vida foram cuidadosamente separados em conformidade com as etapas previamente definidas na delimitação do escopo do sistema. Isso implica em considerar desde o trajeto de transporte desde a instalação fabricante até a unidade de beneficiamento, passando pela aquisição do vidro *float*, subsequente processamento de beneficiamento, até culminar na fase de transporte até o seu destino final, ou seja, o cliente.

Cumprir enfatizar que os dados relativos às fases de fabricação, compreendendo a combinação das matérias-primas essenciais como areia, calcário, barrilha e feldspato, foram extraídos de fontes secundárias, como os catálogos disponibilizados por outras empresas semelhantes que atuam em fabricação, caracterizando informações previamente existentes. No entanto, em relação à etapa de beneficiamento, foram selecionados dados primários de maneira direta e posteriormente também combinados com os catálogos citados anteriormente, conformando-se com as orientações delineadas na norma NBR ISO 14044 (2009b). Porém, essa abordagem na coleta e categorização dos dados garante uma representação fundamentada das etapas envolvidas no ciclo de vida das fachadas envidraçadas, bem como uma boa abrangência das diferentes fontes e naturezas das informações utilizadas.

3.4.1 Inventário dos recursos de produção

Durante o desenvolvimento deste estudo, como constatado anteriormente, as informações detalhadas acerca da matéria-prima e do processo de fabricação do vidro não estavam disponíveis pelo fabricante original do vidro laminado *Silver 20*, que é utilizado no objeto de estudo. Nesse contexto, recorreu-se a um banco de dados de ACV fornecido através de catálogos de diversas empresas, sendo a NSG Group - Pilkington Group Limited (2019), Şişecam Turkey (2022), Ift Rosenheim GmbH (2017) e Laurier Glass Ltd. (2018). Este banco de dados utilizava como ponto de partida 1m² de chapa de vidro *float* de 4mm para conversão no vidro laminado. A análise foi conduzida utilizando o *software Open LCA* (2023), com informações provenientes da *EcoInvent* (v3.7), que se alinha ao vidro abordado no estudo de caso. Os estágios de quantificação apresentados por todas as empresas citadas foram divididos em 4 estágios, denominados A, B, C e D, e delimitados pela fronteira do seu sistema, sendo como o quadro retirado dos panfletos explicam:

Quadro 2 – Estágios delimitados do ciclo de vida do vidro laminado

Produção			Construção		Uso							Fim do ciclo				Reapro- veitam- ento
Fornecimento de matéria-prima	Transporte	Manufatura	Transporte para o local	Montagem	Uso	Manutenção	Reparo	Substituição	Renovação	Uso de energia operacional	Uso de água operacional	Demolição	Transporte	Tratamento de resíduos	Disposição	Reutilização/ Reciclagem
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Fonte: Adaptado de Pilkington (2019), Şişecam Turkey (2022), Rosenheim (2017) e Laurier (2018).

No estudo deste trabalho, não serão utilizadas as informações dispostas a partir da classificação A4 até B7, uma vez que o inventário de informações locais é diferente da aplicação, construção e uso do documentos catalogados, onde todos são coletados na Europa.

No que diz respeito à medição das entradas e saídas de recursos documentadas no estudo sobre o vidro laminado, todas as informações foram obtidas a partir da base de dados do *software Open LCA*, conforme apresentado na tabela 1, uma vez que a empresa fabricante e nem beneficiadora não dispunham das informações de quantitativos para entrada e saída na produção deste material. As quantidades estão expressas para cada metro quadrado de vidro, equivalente a 10 quilogramas.

Tabela 1 - Entradas e saídas de recursos do estágio de produção do vidro laminado

Entradas			
Fluxo	Categoria	Unidade	Resultado
Ar	Recurso	kg	0,3642749
Resíduos de alumínio	Desperdício	kg	0,00069575
Barita	Recurso	kg	1,28109E-07
Bário	Recurso	kg	2,26875E-07
Bauxita	Recurso	kg	0,002040779
Biomassa	Recurso	kg	0,02377485
Boro	Recurso	kg	2,78689E-05
Calcita	Recurso	kg	0,55690929
Cromo	Recurso	kg	5,32658E-05
Argila, fogo	Recurso	kg	0,002402307
Carvão, 29,3 MJ por kg	Recurso	kg	0,18045366
Carvão, marrom	Recurso	kg	0,16228206
Carvão, duro, não especificado	Recurso	kg	0,008517943
Cobalto	Recurso	kg	2,99346E-05
Cobre	Recurso	kg	4,2851E-05
Resíduos de cobre	Desperdício	kg	2,25571E-06
Dolomita	Recurso	kg	1,7945024

Feldspato	Recurso	kg	0,000309264
Espato flúor	Recurso	kg	1,8441E-05
Gás, natural, 46.8 MJ por kg	Recurso	kg	0,80408961
Ouro	Recurso	kg	4,5564E-11
Granito, no solo	Recurso	kg	9,42723E-07
Cascalho	Recurso	kg	0,000148877
Gesso	Recurso	kg	0,000135798
Ilmenita	Recurso	kg	0,000959522
Ferro	Recurso	kg	0,043891011
Chumbo	Recurso	kg	1,292E-05
Magnésio	Recurso	kg	8,37419E-16
Manganês	Recurso	kg	0,000480602
Níquel	Recurso	kg	9,72816E-06
Nitrogênio	Recurso	kg	0,006114894
Ocupação florestal, intensiva	Recurso	m2*a	0,000530709
Ocupação, heterogênea, agrícola	Recurso	m2*a	3,5739663
Ocupação, pastagem e campina, extensa	Recurso	m2*a	0,001084732
Ocupação, pastagem e prado, intensivo	Recurso	m2*a	2,17652E-05
Ocupação, cultura permanente	Recurso	m2*a	2,70935E-05
Ocupação, cultura permanente, fruta	Recurso	m2*a	7,05341E-08
Ocupação, urbana, construída continuamente	Recurso	m2*a	0,000108473
Petróleo bruto	Recurso	kg	1,3671184
Olivina	Recurso	kg	0,000164731
Oxigênio	Recurso	kg	0,022927672
Turfa	Recurso	kg	1,59535E-05
Minério de fosfato	Recurso	kg	9,89521E-05
Cloreto de Potássio	Recurso	kg	2,71504E-05
Rocha, inerte	Recurso	kg	1,9117074
Rutilo	Recurso	kg	5,3668E-08
Areia, quartzo	Recurso	kg	0,024874808
Areia, não especificada	Recurso	kg	8,5671997
Selênio	Recurso	kg	8,68251E-14
Xisto	Recurso	kg	0,070351567
Prata	Recurso	kg	4,23745E-09
Carbonato de Sódio	Recurso	kg	1,09978E-05
Cloreto de Sódio	Recurso	kg	0,27423045
Solo	Recurso	kg	0,001008279
Enxofre	Recurso	kg	0,021377442
Lata	Recurso	kg	5,15388E-06
Água, resfriamento, bebida	Recurso	kg	0,044900151
Água, resfriamento, sal, oceano	Recurso	kg	1,5252191
Água, resfriamento, superfície	Recurso	kg	1,7853463
Água, refrigeração, poço	Recurso	kg	0,00370734
Água, refrigeração, poço, no solo	Recurso	kg	0,40548485
Água, processo, beber	Recurso	kg	33,679674

Água, processo, sal, oceano	Recurso	kg	1,3210583
Água, processo, superfície	Recurso	kg	5,47361761
Água, origem natural não especificada/kg	Recurso	kg	3,2553399
Madeira e resíduos de madeira, 20,9 MJ por kg, base seca no forno	Recurso	kg	0,004410753
Madeira, não especificada, em pé/kg	Recurso	kg	0,078994511
Zinco	Recurso	kg	0,008112917
Resíduos de zinco	Desperdício	kg	6,37744E-06

Saídas			
Fluxo	Categoria	Unidade	Resultado
Aldeídos, não especificados	Emissão para o ar	kg	2,01129E-06
Alumínio	Emissão para a água	kg	4,14557E-08
Amônia	Emissão para o ar	kg	5,08872E-05
Amônio, íon	Emissão para a água	kg	4,60374E-06
Antimônio	Emissão para o ar	kg	2,93191E-07
AOX, halogênio orgânico adsorvível como Cl	Emissão para a água	kg	2,01527E-06
Arsênico	Emissão para o ar	kg	1,85913E-08
Arsênico, íon	Emissão para a água	kg	1,85893E-08
Atrazina	Emissão para a água	kg	1,87494E-10
Atrazina	Emissão para o ar	kg	2,02152E-08
DBO5, Demanda Biológica de Oxigênio	Emissão para a água	kg	8,00183E-05
Boro	Emissão para a água	kg	2,01918E-08
Bromato	Emissão para a água	kg	1,69711E-07
Cádmio	Emissão para o ar	kg	7,25098E-11
Cádmio, íon	Emissão para a água	kg	1,19146E-10
Cálcio, íon	Emissão para a água	kg	0,002172722
Dióxido de carbono, fóssil	Emissão para o ar	kg	7,4630064
Dióxido de carbono, do solo ou estoque de biomassa	Emissão para o ar	kg	-0,049091522
Dissulfeto de carbono	Emissão para o ar	kg	3,35956E-11
Monóxido de carbono	Emissão para o ar	kg	0,007457763
Carbonato	Emissão para a água	kg	0,000608397
Resíduos químicos, inertes	Desperdício	kg	0,013405661
Resíduos químicos, regulamentados	Desperdício	kg	0,009145576
Clorato	Emissão para a água	kg	2,43073E-05
Cloreto	Emissão para a água	kg	3,14559E-13
Cloro	Emissão para o ar	kg	2,57502E-07
Cloro	Emissão para a água	kg	0,039633969
Cromo	Emissão para o ar	kg	8,32858E-07
Cromo VI	Emissão para a água	kg	7,55117E-09
Cromo, íon	Emissão para a água	kg	3,55294E-07
cis-Dicloroeteno	Emissão para o ar	kg	1,25602E-11
Rejeitos de carvão	Desperdício	kg	0,000114493
DQO, Demanda Química de Oxigênio	Emissão para a água	kg	0,002316059

Resíduos de construção	Desperdício	kg	0,002553565
Cobre	Emissão para o ar	kg	4,34041E-08
Cobre, íon	Emissão para a água	kg	1,1885E-07
Cianeto	Emissão para a água	kg	5,5976E-09
Detergentes, óleo	Emissão para a água	kg	0,000119232
Monóxido de dinitrogênio	Emissão para o ar	kg	0,000227676
Sólidos dissolvidos	Emissão para a água	kg	0,000849429
COD, carbono orgânico dissolvido	Emissão para a água	kg	2,52771E-05
Etano, 1,2-dicloro-	Emissão para a água	kg	3,21185E-11
Etano, 1,2-dicloro-	Emissão para o ar	kg	5,69622E-09
Eteno	Emissão para o ar	kg	2,91776E-07
Óxido de etileno	Emissão para o ar	kg	2,96151E-08
Fluoreto	Emissão para a água	kg	1,76578E-07
Flúor	Emissão para o ar	kg	1,1852E-07
Resíduos de vidro	Desperdício	kg	0,003222548
Ouro	Emissão para o ar	kg	4,70903E-13
Hidrocarbonetos aromáticos	Emissão para o ar	kg	5,64107E-06
Hidrocarbonetos, não especificados	Emissão para o ar	kg	0,020698241
Hidrocarbonetos, não especificados	Emissão para a água	kg	6,00472E-06
Hidrogênio	Emissão para o ar	kg	0,002275458
Hidrogênio	Emissão para a água	kg	6,54322E-06
Cloreto de hidrogênio	Emissão para o ar	kg	0,000357979
Cianeto de hidrogênio	Emissão para o ar	kg	7,369E-10
Fluoreto de hidrogênio	Emissão para o ar	kg	1,04591E-05
Sulfato de hidrogênio	Emissão para o ar	kg	2,64066E-06
Ferro	Emissão para o ar	kg	6,68412E-10
Ferro, íon	Emissão para a água	kg	4,08052E-07
Chumbo	Emissão para o ar	kg	5,07162E-08
Chumbo	Emissão para a água	kg	2,97426E-08
Lítio, íon	Emissão para a água	kg	9,98781E-12
Magnésio	Emissão para a água	kg	6,92987E-07
Manganês	Emissão para a água	kg	6,16111E-10
Mercurio	Emissão para o ar	kg	7,61837E-07
Mercurio	Emissão para a água	kg	3,36323E-09
Resíduos metálicos	Desperdício	kg	6,44736E-05
Metais, não especificados	Emissão para o ar	kg	0,00016929
Metais, não especificados	Emissão para a água	kg	3,05379E-05
Metano, biogênico	Emissão para o ar	kg	4,83213E-05
Metano, dicloro-, HCC-30	Emissão para o ar	kg	8,08092E-11
Metano, fóssil	Emissão para o ar	kg	0,02536278
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Emissão para o ar	kg	3,5155E-07
Metil mercaptano	Emissão para o ar	kg	5,29068E-07
Resíduos minerais	Desperdício	kg	0,021536276
Níquel	Emissão para o ar	kg	9,82721E-08
Níquel, íon	Emissão para a água	kg	7,21163E-09

Nitrato	Emissão para a água	kg	0,000108846
Óxidos de nitrogênio	Emissão para o ar	kg	0,035082144
Matéria Nitrogenada, não especificada, como N	Emissão para a água	kg	4,69761E-06
Carbono orgânico	Emissão para o ar	kg	2,79917E-05
Substâncias orgânicas, não especificadas	Emissão para a água	kg	0,000209944
Organoclorado, não especificado	Emissão para o ar	kg	0,000331446
Organoclorado, não especificado	Emissão para a água	kg	3,39397E-06
Oxigênio	Emissão para o ar	kg	0,047446433
Resíduos de embalagens, papel e cartão	Desperdício	kg	0,027222575
PAH, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	Emissão para o ar	kg	1,56116E-08
Partículas, fuligem diesel	Emissão para o ar	kg	0,000223734
Partículas, não especificadas	Emissão para o ar	kg	0,014429942
Fenóis, não especificados	Emissão para a água	kg	1,73995E-06
Fosfato	Emissão para a água	kg	9,40052E-06
Resíduos plásticos	Desperdício	kg	0,002086403
Resíduos de polietileno	Desperdício	kg	0,001961155
Potássio	Emissão para a água	kg	3,31879E-05
Rejeitos radioativos	Desperdício	kg	8,66552E-07
Prata	Emissão para o ar	kg	3,23341E-13
Escórias e cinzas	Desperdício	kg	0,017164994
Sódio, íon	Emissão para a água	kg	0,015470386
Sulfato	Emissão para a água	kg	0,000348801
Enxofre	Emissão para a água	kg	3,06398E-07
Óxidos de enxofre	Emissão para o ar	kg	0,083199507
Ácido sulfúrico	Emissão para o ar	kg	2,60592E-08
Sólidos suspensos, não especificados	Emissão para a água	kg	0,007711251
Resíduos de estanho	Desperdício	kg	-0,011657568
COT, Carbono Orgânico Total	Emissão para a água	kg	0,000428959
COV, compostos orgânicos voláteis	Emissão para o ar	kg	2,50724E-05
Resíduos em aterro bioativo	Desperdício	kg	0,00010649
Resíduos na incineração	Desperdício	kg	0,000248018
Resíduos em aterro inerte	Desperdício	kg	0,007094453
Resíduos para reciclagem	Desperdício	kg	1,8538947
Resíduos, finais, inertes	Desperdício	kg	1,4203639
Resíduos, não especificados	Desperdício	kg	0,035795997
Água	Emissão para o ar	kg	0,076951697
Resíduos de madeira	Desperdício	kg	0,005972528
Zinco	Emissão para o ar	kg	1,43077E-07
Zinco, íon	Emissão para a água	kg	3,40105E-08

Fonte: Adaptado de *Open LCA* (2023).

3.4.2 Inventário de energia

Acerca do inventário energético, o repositório de informações do *Open LCA* não apresenta os gastos em MJ ou kW, desta forma, as informações foram adquiridas através dos

catálogos das empresas anteriormente mencionadas e também da fábrica de beneficiamento. A beneficiadora consome energia de maneira predominante na forma de eletricidade, e essa energia é direcionada para várias finalidades dentro das instalações. O uso abrange desde o condicionamento do ar para manter as condições ideais de trabalho até a iluminação adequada para as atividades diárias. Além disso, a energia é empregada no funcionamento das bombas para abastecimento da água e no funcionamento do maquinário essencial para o processo de beneficiamento. É importante destacar que a fonte de energia provém da matriz elétrica nacional, intitulada ENERGISA. A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável devido à significativa contribuição da energia hidrelétrica e ao crescimento da energia eólica. Esta energia é crucial para as operações diárias e a eficiência da fábrica de beneficiamento.

A energia utilizada na fábrica é majoritariamente expressa em quilowatts por metro quadrado de vidro (kW/m² vidro), e uma particularidade a ser considerada é a complexidade da medição do consumo. Devido à integração dos valores de consumo entre a fábrica e o escritório, tornou-se necessário realizar um levantamento empírico para determinar a quantidade de energia consumida apenas no processo de beneficiamento de cada chapa de vidro. Essa abordagem permite uma análise do consumo energético relacionado diretamente às operações de beneficiamento, contribuindo para uma avaliação mais detalhada do impacto ambiental dessa etapa específica do ciclo de vida do produto.

Tabela 2 - Entrada de energia no sistema de beneficiamento para 1m² de vidro laminado

Material	Qntd.	Unid.	Fonte
Energia	11,28	kW/m ² vidro	Calculado pela autora

Fonte: Autora (2023).

3.4.3 Inventário de água da beneficiadora

De acordo com as políticas da empresa, informadas por um funcionário interno, a fábrica adota uma prática sustentável ao empregar uma estação de tratamento de água (ETA) durante um período de seis meses. Posteriormente, a água tratada é utilizada para a limpeza dos pátios e instalações da própria fábrica. Essa abordagem evidencia o compromisso com a redução do consumo de água e a minimização do impacto ambiental associado a essa atividade industrial.

Com essa estratégia, a fábrica consegue reaproveitar eficientemente a água tratada, contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e a mitigação dos potenciais danos ambientais. Em termos quantitativos, a fábrica reutiliza cerca de 5 mil litros de água por mês, levando em consideração o uso ao longo de seis meses proporcionado pela ETA. Esse número

ilustra o impacto positivo que a reutilização de água pode ter em termos de conservação e uso eficiente dos recursos hídricos.

Tabela 3 - Entrada de água pela beneficiadora para 1m² de vidro laminado

Material	Qntd.	Unid.	Fonte
Água	2,5	L	Calculado pela autora

Fonte: Autora (2023).

Esse número ilustra o impacto positivo que a reutilização de água pode ter em termos de conservação e uso eficiente dos recursos hídricos.

3.4.4 Inventário dos produtos de processamento e beneficiamento

No início do processo de beneficiamento do vidro *float*, uma variedade de componentes é empregada nos equipamentos, indo além do consumo de energia e água. Cada máquina mencionada anteriormente – desde a carregadora até a lapidadora – demanda um tipo específico de material e quantidade. Mediante as entrevistas com a empresa encarregada das operações, foi viável obter os dados quantitativos também para cada metro quadrado de vidro laminado *Silver 20* fabricado.

Sabe-se que na máquina carregadora, somente energia é empregada, como já calculado previamente. Na lavadora, que se apresenta duas vezes no procedimento de acordo com o fluxograma exibido na figura 15, o processo exige água e detergente como insumos. Ao avançar para a sala fria, o filme de PVB é aplicado sobre o vidro, seguido por sua transferência para a calandra e autoclave, ambas consumindo apenas energia. No processo de corte do vidro, o óleo de corte é utilizado, enquanto para a lapidação, rebolo e água são empregados, após o qual o vidro é novamente lavado como parte da preparação para envio ao cliente. Além disso, também considera-se, para efeitos de cálculo, o quantitativo de mão de obra e tempo gastos.

Baseando-se nessas informações obtidas e realizando cálculos proporcionais à produção mensal para fabricar 1m² do material, resulta em:

Tabela 4 - Entrada de produtos pela beneficiadora para 1m² de vidro laminado

Material	Qntd.	Unid.	Fonte
Vidro float	2,0	m ²	Calculado pela autora
PVB	1,0000	m ²	Calculado pela autora
Rebolo	0,0025	un	Calculado pela autora
Óleo de corte	0,0033	L	Calculado pela autora

Mão de obra	0,0040	Funcionários	Calculado pela autora
Tempo	0,0875	h	Calculado pela autora

Fonte: Autora (2023).

Os materiais empregados nesta etapa não são observados nos mesmos catálogos citados anteriormente, portanto, para esta fase do estudo, os produtos também são exclusivos.

3.4.5 Inventário de resíduos

A empresa estima a quantidade de resíduos gerados e a informação recebida é de que cerca de 25% do vidro *float* utilizado no processo de revestimento é reciclado. Quando a reciclagem não é viável, a corporação busca alternativas para o reaproveitamento dos materiais. Uma delas é utilizá-los para revestir porcelanato em fibra de vidro, transformando-os em um novo produto, além de também serem aplicados no processo de jateamento de peças industriais.

Mensalmente, são enviadas de 60 a 90 toneladas de resíduos de volta para a fábrica principal ou para o interior de São Paulo, onde esses resíduos são recebidos e utilizados conforme mencionado anteriormente.

3.4.6 Inventário do transporte da matéria-prima

A base de cálculo para a emissões provenientes do transporte é compatível com a EN ISO 14083:2023 – *Greenhouse gases - Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations*, norma internacional que aborda a metodologia de emissão de efluentes em transportes, sendo que a plataforma utilizada para a precisão dos dados foi a calculadora da EcoTransit World®, disponibilizada *on-line*, fornecendo as informações apenas inserindo a quantidade de carga, distância do destino e tipo de veículo para o transporte.

Como o transporte da extração de matéria-prima até a manufatura já está incubido nos dados referentes à base de dados do *Open LCA*, Pilkington (2019), Şişecam Turkey (2022), Rosenheim (2017) e Laurier (2018), na próxima etapa é calculado apenas o referente à etapa de transporte do vidro pré e pós-beneficiamento, onde o trajeto estudado é o da cidade de Tatuí, em São Paulo, até Ji-Paraná, em Rondônia, e posteriormente até a capital também de Rondônia, Porto Velho, até onde a edificação de objeto de estudo é localizada.

3.5 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Como citado anteriormente, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida é a abordagem sistemática para avaliar os impactos ambientais do produto, processo ou atividade ao longo de todo o seu ciclo. Esta avaliação envolve a análise dos potenciais efeitos adversos ou benéficos de um produto ou atividade no meio ambiente e na sociedade. Ela visa quantificar e caracterizar os impactos ambientais associados às etapas do ciclo de vida, como a extração de recursos naturais, a produção, o transporte, o uso e a disposição final.

Durante a fase de AICV, várias categorias de impacto são consideradas, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, poluição do ar, da água e do solo, entre outros. Métodos específicos são usados para quantificar esses impactos, e os resultados são geralmente expressos em unidades específicas, como toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) para impactos nas mudanças climáticas.

3.5.1 Categoria e avaliação de impacto

A categoria e avaliação de impacto é uma das fases do ciclo de vida em que os resultados da fase anterior, sobre a inventariação do ciclo de vida, são traduzidos em potenciais impactos ambientais associados às diferentes categorias de impacto relevantes. Isso é feito por meio da atribuição de valores aos indicadores de impacto ambiental, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, entre outros, de acordo com as categorias de impacto definidas nos quantitativos apresentados nos tópicos anteriores.

Logo, no ato da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, as considerações e embasamentos foram feitos em cima da abordagem CML 2001, que representa uma abordagem de avaliação de impacto que engloba indicadores de categoria que se diferenciam em dois tipos: *midpoint*, que aborda os problemas diretamente relacionados, e *endpoint*, que se concentra nos danos gerados. Trata-se de um amplo conjunto de informações que abrangem não apenas a Europa, mas também uma perspectiva global. Dentro das categorias reconhecidas pelo CML, existem diversas classificações de impactos ambientais, totalizando oito, sendo estas: acidificação potencial, destruição da camada de ozônio, esgotamento de recursos não-biológicos, ecotoxicidade, eutrofização potencial, mudança climática, formação fotoquímica de ozônio e toxicidade humana.

No entanto, para se alinhar com as considerações estabelecidas mais aplicadas que conduziram estudos sobre a Avaliação do Ciclo de Vida aplicada a edifícios no Brasil, principalmente por estudiosos como Rabaça (2015) e Farias *et al.* (2022), além de selecionar a metodologia de impacto semelhante aos trabalhos de Pilkington (2019), Şişecam Turkey

(2022), Rosenheim (2017) e Laurier (2018), foram identificadas as categorias de impacto e indicadores como as mais relevantes para esta AICV no quadro 2:

Quadro 2 - Categorias e indicações de unidade de impacto ambiental

Categorias de Impacto	Abreviação	Unidade
Mudanças Climáticas / Aquecimento Global	GWP (Global Warming Potential)	kg CO2 eq
Eutrofização Potencial	EP	kg PO4 eq
Destruição da Camada de Ozônio	DCO	kg CFC-11 eq
Formação Fotoquímica de Ozônio	FFO / POCP (Photochemical ozone formation)	kg NMVOC eq
Esgotamento de Recursos Não-Biológicos	ERB / ADP (Abiotic Depletion Potential)	kg Sb eq
Acidificação Potencial	AP	mol H+ eq

Fonte: Autora (2023).

Dentro do banco de dados de Pilkington (2019), Şişecam Turkey (2022), Rosenheim (2017) e Laurier (2018), existem cerca de 25 categorias com quantitativos inferiores de emissão de efluentes. Todos os catálogos das empresas mencionadas apresentam os dados dos impactos selecionados, porém, muitos com resultados discrepantes entre si, deixando uma incerteza acerca da qualidade de algumas avaliações, ou até mesmo a considerar um equívoco na conversão para o tipo de vidro estudado. No estudo de caso, estas 6 categorias são as principais e consideradas mais importantes seguindo estudos da mesma relevância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão delineados os resultados de maneira quantitativa, revelando os impactos ambientais associados aos materiais empregados em todas as fases do ciclo de vida. A intenção é disponibilizar esses dados de forma acessível, a fim de facilitar a compreensão das informações quantitativas obtidas.

Os limites do sistema estabelecidos para consideração durante a revisão dos catálogos das quatro empresas abrangeram as fases de extração e pré-processamento de matérias-primas, o processo de produção - englobando desde a fabricação do vidro a partir das matérias-primas até o seu beneficiamento - e também o estágio de armazenamento. Todas as declarações ambientais de produtos adotaram essa mesma abordagem. No entanto, foram observadas algumas disparidades nos impactos ambientais entre as empresas, possivelmente devido a diferenças nas localizações das fabricantes, na variedade de maquinário utilizado ou até mesmo em metodologias distintas de quantificação. A interpretação desses resultados será apresentada ao final do processo.

4.1 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

No âmbito dos estudos sobre a ACV, devido à escassez de bases de dados específicas no contexto brasileiro, foi necessário recorrer em grande parte a bancos de dados internacionais, que oferecem uma gama mais ampla de informações disponíveis. Existem diversos *softwares* estão disponíveis para facilitar as análises, simplificando a seleção dos dados do inventário e tornando a avaliação dos impactos mais acessível. Assim, o banco de dados da *EcoInvent v3.7*, dentro do *software Open LCA* desempenhou um papel central como principal fonte de informações. Além disso, este mesmo depósito de dados também foi base de estudo para as quatro empresas que serviram de material comparativo neste trabalho, com suas respectivas Declarações Ambientais de Produto, que possuem a ACV do vidro laminado fabricada por cada uma, mas que, como citado anteriormente, utilizam as regras de bancos de dados internacionais.

O processo de conectar as informações sobre o ciclo de vida do vidro laminado envolveu a adaptação dos dados coletados para se ajustarem ao estudo de caso em questão. Este método para alcançar os resultados expôs uma problemática, onde poucas empresas fabricantes e beneficiadoras do vidro *float* e laminado no âmbito nacional possuem o documento chamado Declaração Ambiental de Produto, com os respectivos quantitativos de recursos utilizados, emissões de poluentes e efluentes, evidenciando uma negligência com o meio ambiente. Assim, todos os dados levantados através da empresa Mirandex Vidros© não puderam ser aplicados

na prática para os métodos de comparação destes resultados, devido não apresentarem a quantificação em impactos ambientais ou sua DAP.

Assim, utilizando o banco de dados internacional, foi possibilitada uma análise abrangente dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da vidrúcea das fachadas em *structural glazing*. Diante das cinco bibliografias reunidas, sendo quatro provenientes da DAP das empresas europeias e uma do *software Open LCA*, com dados oriundos da Austrália, foi possível realizar uma comparação utilizando o quantitativo total de vidro laminado aplicado na Assembleia Legislativa de Rondônia, em busca de determinar um ponto em comum de quais atividades impactam em maior escala no meio ambiente.

Durante o processo de revisão bibliográfica, foi necessário ajustar as bases de cálculo que inicialmente se aplicavam a 1m² de vidro laminado com 1mm de espessura para a escala total da fachada em *Structural Glazing*, composta por uma área de 3.156,43m², e com uma espessura final de 8,4mm. Isso engloba não apenas a instalação inicial, mas também considera os eventos posteriores à instalação, como a manutenção e eventual substituição de componentes. Assim, os gráficos e tabelas abaixo ficaram relacionados entre si por quantificação dos impactos ambientais, oferecendo uma compreensão clara dos custos associados e das emissões de resíduos para cada parâmetro analisado.

4.1.1 Impacto nas Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas (em inglês, o termo mais utilizado é *Global Warming Potential*, sendo sua sigla nas literaturas como GWP) para têm uma ligação direta com a liberação de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), resultando em um aumento na absorção da radiação emitida pela Terra. Essa dinâmica tem consequências prejudiciais para a saúde dos ecossistemas.

Quando analisamos o impacto do aumento do efeito estufa, considerando os dados correlacionados obtidos a partir da avaliação de impacto de ciclo de vida do vidro laminado de empresas como Pilkington (2019), Şişecam Turkey (2022), Rosenheim (2017), Laurier (2018) e da aplicação direta dos dados no *software Open LCA*, podemos observar o reflexo desse fenômeno na tabela 5 e no gráfico apresentado na Figura 18.

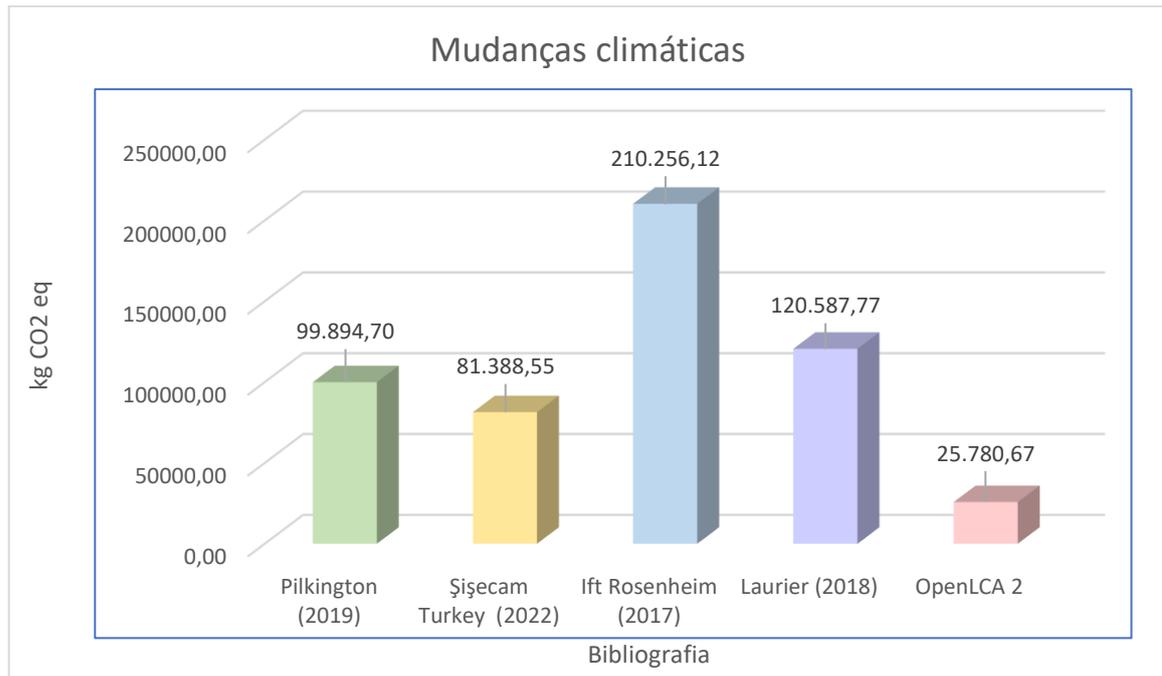
Tabela 5 – Impacto ambiental referente às mudanças climáticas, em kg CO₂ eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
99894,70	kg CO ₂ eq	Pilkington (2019)

81388,55	kg CO2 eq	Şişecam Turkey (2022)
210256,12	kg CO2 eq	Ift Rosenheim (2017)
120587,77	kg CO2 eq	Laurier (2018)
25780,67	kg CO2 eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 18 - Contribuição para o impacto ambiental em mudanças climáticas de cada empresa, em comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

Ao observar o gráfico acima, nota-se uma discrepância quantitativa de emissão de CO₂ pela Ift Rosenheim (2017) e Laurier (2018), em 210.256,12 kg CO₂ eq e 120.587,77 kg CO₂ eq, respectivamente. Uma das hipóteses levantadas para a diferença de valores pode ser de que a base de dados é datada há mais de 5 e 6 anos, considerando que houveram muitos avanços na fabricação e beneficiamento do vidro *float* nos últimos tempos, possibilitando a redução dos valores na atualidade.

Outra alternativa é que, por serem diferentes DAP's, com diferentes localidades e diferentes padrões de espessura do vidro laminado em seu resultado final, juntamente com a ausência de coeficientes nos estudos de ciclo de vida e inventário para adaptar a variação de espessura e peso de cada chapa (um fator que pode variar conforme o país e suas necessidades), pode existir uma margem de erro na conversão em uma metragem quadrada total, com outra espessura diferente da habitual da corporação citada.

Os resultados de Pilkington (2019) e Şişecam Turkey (2022) assemelham-se graficamente, exceto pelo quociente oriundo do *Open LCA*. Esta redução obtida pelo *software* pode ser explicada pela atualização recorrente do banco de dados e também localização distinta dos demais parâmetros, uma vez que este conjunto de registros da *EcoInvent 3.7* e fábrica do vidro laminado é da Oceania, enquanto os demais localizam-se no continente Europeu.

Ademais, a quantidade exarcebada de CO₂ gerado na produção da peça vítrea laminada no continente Europeu e Oceania podem ser explicados pelo uso de energia em combustível fóssil; caso o estudo fosse aplicado para o Brasil, os valores poderiam ser drasticamente reduzidos, uma vez que a matriz energética do Brasil é principalmente composta por fontes renováveis, o que resulta em emissões per capita de gases de efeito estufa mais baixas em comparação com a maioria dos países, e no contexto de que a utilização de energia predominante no âmbito nacional é de energia hidráulica, com o aproveitamento da água dos rios. Fontes não renováveis de energia tendem a ser grandes emissores de gases de efeito estufa, que culminam no aquecimento global. Essa característica da matriz energética brasileira é crucial no contexto das mudanças climáticas.

4.1.2 Impacto na Eutrofização Potencial

A eutrofização é um processo em que há um excesso de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, na água, levando a um crescimento descontrolado de plantas aquáticas, como algas. O resultado é a redução do oxigênio na água, levando à morte de peixes e outros organismos aquáticos.

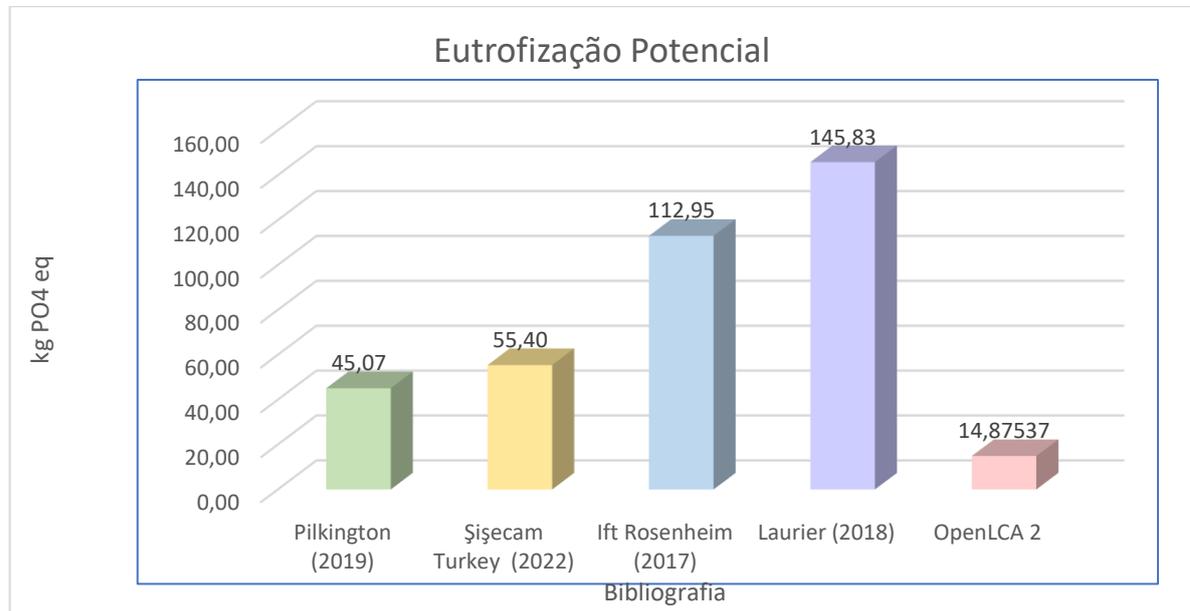
Em termos mensuráveis, a eutrofização não obteve valores tão consideráveis considerando o impacto anterior. Esta quantificação pode ser avaliada na tabela 6 e figura 19.

Tabela 6 - Impacto ambiental referente à Eutrofização Potencial, em kg PO₄ eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
45,07382	kg PO ₄ eq	Pilkington (2019)
55,39535	kg PO ₄ eq	Şişecam Turkey (2022)
112,94969	kg PO ₄ eq	Ift Rosenheim (2017)
145,82707	kg PO ₄ eq	Laurier (2018)
14,87537	kg PO ₄ eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 19 - Contribuição para o impacto ambiental na Eutrofização de cada empresa, em comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

O gráfico de eutrofização evidencia a discordância de dados e possível gastos acentuados para os parâmetros ambientais de cada corporação. Como observado, os valores de Pilkington (2019) e Şişecam Turkey (2022), novamente, se assemelham, desta vez com pouca diferença numérica (45,07kg PO4 eq e 55,40kg PO4 eq). A equivalência pode ser justificada devido a aproximação da localidade de fabricação, dados atualizados conforme o ano e fabricação de mesma metodologia e maquinário.

Por outro lado, no caso de Ift Rosenheim (2017) e Laurier (2018), embora suas DAP's registrem aproximadamente o dobro em comparação com Pilkington (2019) e Şişecam Turkey (2022), os números apresentam semelhanças. Todas essas empresas, incluindo as demais, indicam um impacto mais significativo na eutrofização, com a Laurier assumindo o papel principal como a principal contribuinte. No entanto, é crucial levar em conta a possibilidade de desacertos na quantificação dos dados, o que pode resultar em variações nos resultados finais e requer uma análise mais detalhada para uma compreensão abrangente do cenário.

No *Open LCA*, novamente, é notório o baixo impacto gerado na produção do vidro. O banco de dados *EcoInvent 3.7* não exprime outros dados semelhantes que pudessem ser postos nesta mesma categoria, o que dá a entender que o processo produtivo na Austrália, de fato, afeta em menor escala a eutrofização.

4.1.3 Impacto na Destruição da Camada de Ozônio

A destruição da camada de ozônio é a redução da concentração de ozônio na estratosfera, causada principalmente por substâncias químicas humanas chamadas de Clorofluorocarbonetos (CFCs) e Halons. Isso resulta em um enfraquecimento da proteção natural contra a radiação ultravioleta prejudicial do sol. A quantificação em valores das emissões que afetam a camada de ozônio ajuda a avaliar o custo dos danos causados à saúde humana, à agricultura, à vida marinha e ao meio ambiente em geral.

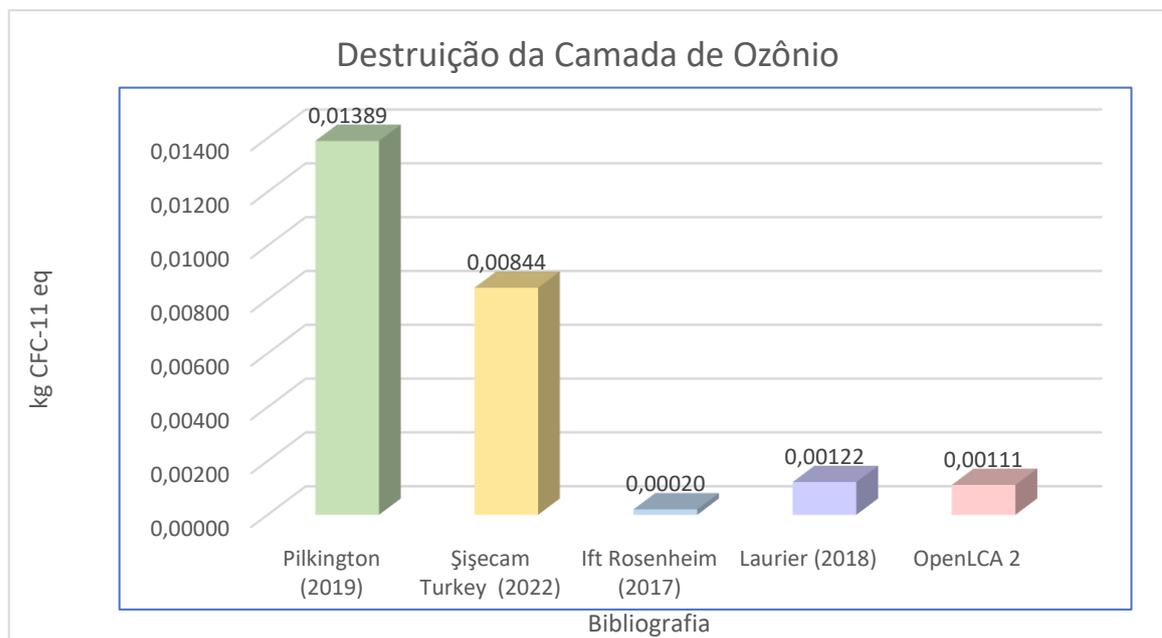
Os cálculos do impacto da camada de ozônio são expressos em kg CFC-11 eq. O sistema de produção de chapas de vidro laminado não é um fator de intenso agrave para a classificação definida, uma vez suas quantidades são mais reduzidas que outros ramos de fabricação no mercado.

Tabela 7 - Impacto ambiental referente à destruição da Destruição da Camada de Ozônio, em kg CFC-11 eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
0,01389	kg CFC-11 eq	Pilkington (2019)
0,00844	kg CFC-11 eq	Şişecam Turkey (2022)
0,00020	kg CFC-11 eq	Ift Rosenheim (2017)
0,00122	kg CFC-11 eq	Laurier (2018)
0,00111	kg CFC-11 eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 20 - Contribuição para o impacto ambiental na Destruição da Camada de Ozônio de cada empresa, em comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

Neste resultado, todas as informações catalogadas chegaram em um valor próximo uns dos outros. O repositório de dados do *Open LCA*, de Laurier (2018) e Ift Rosenheim (2017), no quantitativo em kg CFC-11 eq, se assemelharam em números, sendo que apenas o Ift Rosenheim (2017) encontrou-se com uma casa decimal abaixo dos demais. As informações de Pilkington (2019) abriram interpretação para que seu processo produtivo fosse entendido, entre os valores baixos das outras bibliografias, como o que mais afeta a camada de ozônio.

Ainda sim, os resultados são positivamente mais baixos em comparação à outros impactos já avaliados, uma vez que todas as cinco bases analisadas expressam um valor pouco significativo.

4.1.4 Impacto na Formação Fotoquímica de Ozônio

O impacto de formação fotoquímica de ozônio é o processo pelo qual o ozônio (O₃) é produzido na atmosfera como resultado de reações químicas desencadeadas pela luz solar (Dallarosa, 2005). Isso ocorre principalmente em áreas urbanas e industriais onde há a presença de poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs).

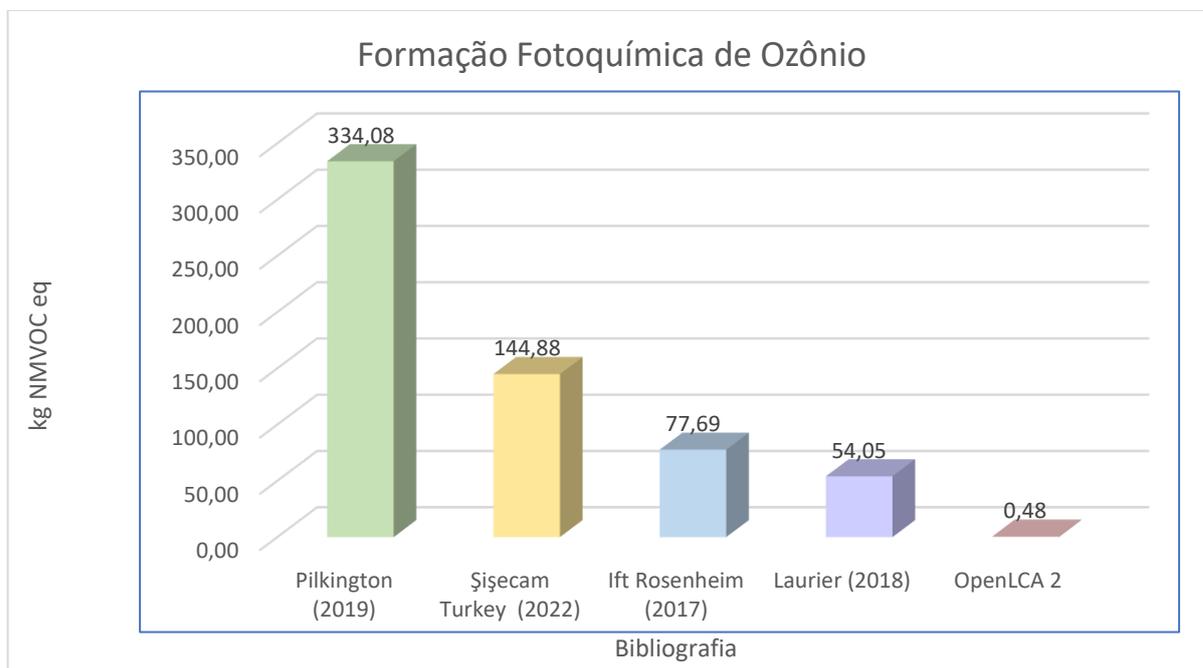
Conforme foram analisados os cinco banco de dados disponíveis, nota-se a incerteza desta informação dentro do *Open LCA*, levando a entender que a referência necessita da busca de outro banco de dados para o cálculo. Os outros quantitativos são expressos na tabela 8.

Tabela 8 - Impacto ambiental referente à Formação Fotoquímica de Ozônio, em kg NMVOC eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
334,07655	kg NMVOC eq	Pilkington (2019)
144,88014	kg NMVOC eq	Şişecam Turkey (2022)
77,68606	kg NMVOC eq	Ift Rosenheim (2017)
54,04779	kg NMVOC eq	Laurier (2018)
0,48217	kg NMVOC eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 21 - Contribuição para o impacto ambiental na Formação Fotoquímica de Ozônio de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

As resultantes de Şişecam Turkey (2022), Ift Rosenheim (2017) e Laurier (2018) não possuem considerável semelhança quantitativa entre si, porém, são excessivamente mais reduzidas que os valores obtidos por Pilkington (2019). Não é possível observar na DAP de Pilkington (2019) o que eleva exageradamente o valor de kg NMVOC eq para a formação fotoquímica de ozônio; porém, se as avaliações quantitativas estiverem corretas conforme seu processo de fabricação, é necessário que a organização busque medidas de redução para não alimentar o sistema de impactos na saúde humana, danos às plantas, poluição do ar, e contribuições para as mudanças climáticas.

A controvérsia desta informação no *software Open LCA* também prejudica a análise deste impacto, uma vez que, sem um parâmetro de comparação além das empresas europeias, a leitura da escala deste impacto na natureza pode se manifestar em consequências futuras no meio ambiente.

4.1.5 Impacto no Esgotamento de Recursos Não-Biológicos

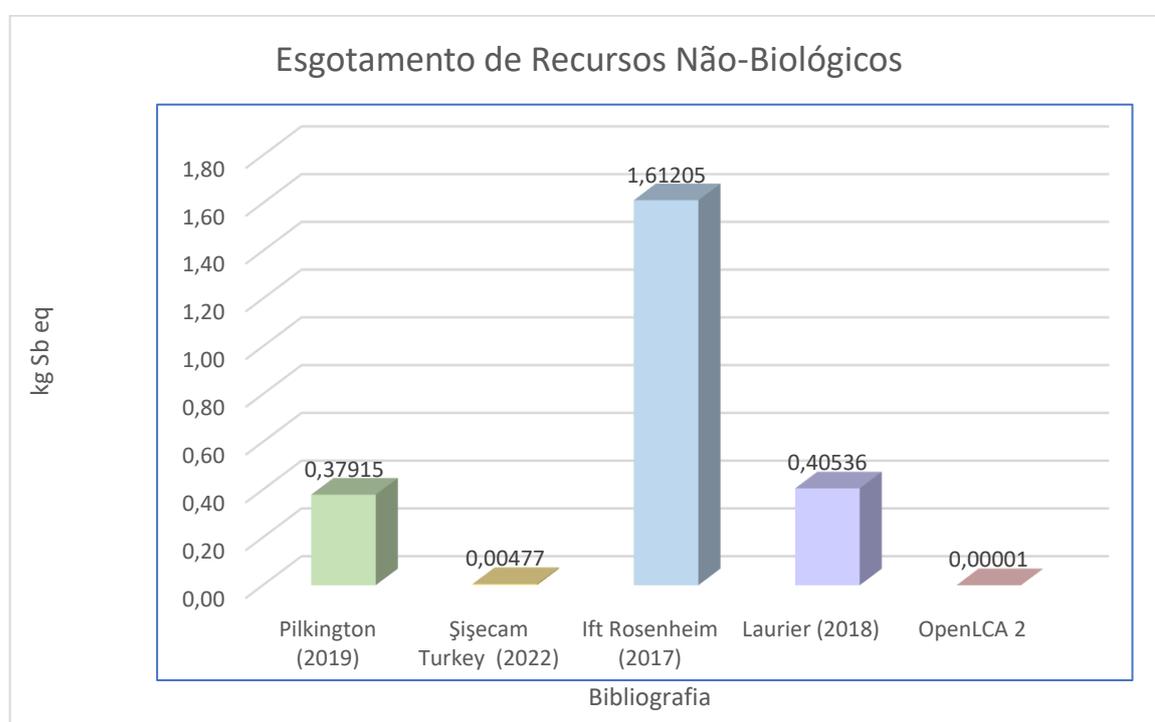
O esgotamento de recursos naturais não-biológicos inclui minerais, metais, combustíveis fósseis e outros materiais inorgânicos que são extraídos da crosta terrestre para uso humano. Os quantitativos, dados em kg Sb eq, são expostos na tabela 9, e graficamente comparados na figura 22.

Tabela 9 - Impacto ambiental referente ao Esgotamento de Recursos Não-Biológicos, em kg SO₂ eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
0,37915	kg Sb eq	Pilkington (2019)
0,00477	kg Sb eq	Şişecam Turkey (2022)
1,61205	kg Sb eq	Ift Rosenheim (2017)
0,40536	kg Sb eq	Laurier (2018)
0,00001	kg Sb eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 22 - Contribuição para o impacto ambiental no Esgotamento de Recursos Não-Biológicos de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

Ao analisar o gráfico acima, percebe-se que os índices de esgotamento de recursos não-biológicos, assim como a destruição da camada de ozônio, se mantêm em níveis relativamente baixos, mesmo considerando a produção total de vidro laminado para a fachada em estudo. Esses resultados sugerem uma eficiência notável no uso de recursos não-renováveis e uma abordagem responsável, o que é um aspecto positivo neste ramo de produção. No entanto, é notável que o programa *Open LCA* causa dúvida ao apresentar um resultado tão baixo, o que pode ser atribuído à complexidade das interações ambientais envolvidas; porém, ao comparar com os resultados de Şişecam (2022), observamos uma semelhança, indicando que ambas as empresas podem estar adotando práticas ambientalmente conscientes em relação a esses impactos específicos.

Em contrapartida, a análise de Ift Rosenheim (2017) aponta para efeitos potencialmente mais preocupantes nessa etapa do ciclo de vida do produto. Isso destaca a importância de uma avaliação minuciosa e específica para cada estágio da produção do vidro laminado, garantindo uma compreensão completa do seu impacto ambiental.

4.1.6 Impacto na Acidificação Potencial

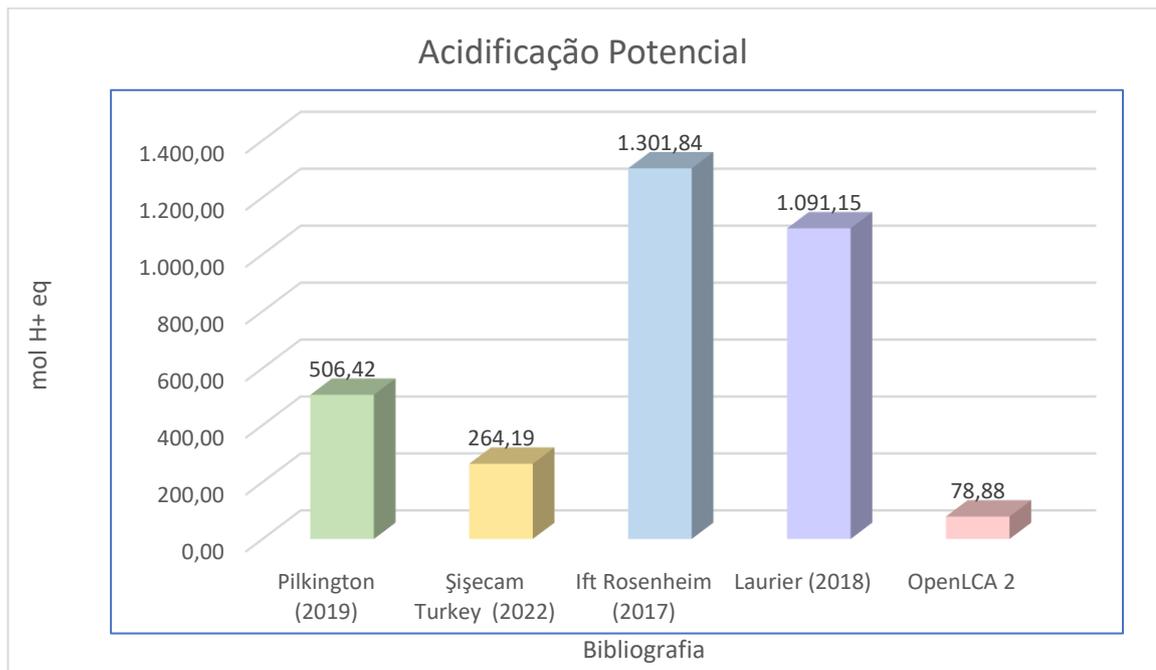
Por fim às análises dos impactos pelo método CML, temos a resultância da Acidificação Potencial, descrita como impacto da capacidade de uma substância ou processo de contribuir para tornar o meio ambiente mais ácido. Esta também é uma das categorias que mais apresentou efeito dentro do processo de produção do vidro laminado, como notório na figura 23.

Tabela 10 - Impacto ambiental referente à Acidificação Potencial, em mol H+ eq.

Quantidade	Unid.	Fonte
506,41763	mol H+ eq	Pilkington (2019)
264,19319	mol H+ eq	Şişecam Turkey (2022)
1301,83799	mol H+ eq	Ift Rosenheim (2017)
1091,15357	mol H+ eq	Laurier (2018)
78,87889	mol H+ eq	OpenLCA 2

Fonte: Autora (2023).

Figura 23 - Contribuição para o impacto ambiental na Acidificação Potencial de cada empresa, em uma metodologia de comparação aos dados registrados no *software Open LCA*.



Fonte: (Autora, 2023).

Novamente, o programa *Open LCA* é o comparativo de menor impacto dentre as demais opções. Pilkington (2019) e Şişecam (2022) estão na média quanto a relevância de impacto quando contrapostos com as pesquisas de Ift Rosenheim (2017) e Laurier (2018), os quais exibem grandes valores para a acidificação. Este tipo de resultado intensifica a preocupação acerca dos efeitos nos solos, água e ecossistemas, prejudicando a vegetação e a vida aquática. Seria imprescindível, então, que as duas corporações buscassem alternativas para a redução destes danos.

4.1.7 Considerações para o transporte

Devido a inviabilidade do desmembramento das etapas que apresentam os poluentes referentes ao transporte dentro dos catálogos das quatro corporações que serviram de revisão bibliográfica e também no aplicativo *Open LCA*, os dados sobre o transporte das chapas de vidro dentro do âmbito do estudo de caso não puderam ser aplicados. Porém, todas as informações acerca do transporte foram fornecidas pela empresa.

A fábrica de vidro float, localizada em Tatuí, no estado de São Paulo, até a cidade de Jiparaná, no estado de Rondônia, é uma etapa crucial no estudo do ciclo de vida e acerca das emissões no trajeto. Essa jornada abrange uma distância considerável de aproximadamente 2.530 quilômetros, e cada chapa de vidro *float* possui um peso médio de 77,04 kg e dimensões de 2,40 x 3,21 metros, e considerando que o transporte envolve 380 dessas chapas, resulta em um total de carga de cerca de 29,28 toneladas. Neste estudo de caso, para atender a construção da fachada da Assembleia Legislativa de Rondônia, seriam necessárias 3 viagens com a carga padrão de 380 chapas, uma vez que o quantitativo do vidro laminado *Silver 20* para a edificação foi de 791 placas em vidro *float* para atender o valor total em obra, totalizado em 3.045,83 m².

A fábrica Guardian Glass® é a responsável por fornecer o material para essa fase do processo. No entanto, é importante mencionar que, durante o percurso, um índice de perda de 2% é esperado, devido a fatores diversos que podem afetar a integridade das chapas durante o transporte, e esta estimativa também foi fornecida por um funcionário interno da empresa. Portanto, essa etapa requer um cuidadoso planejamento logístico para assegurar que a carga seja entregue preservando a integridade do vidro.

É importante destacar os impactos ambientais associados a essa etapa do processo. Considerando apenas uma viagem, o transporte resulta em um consumo de energia de aproximadamente 138.087,6 kWh. Isso contribui para um impacto nas mudanças climáticas estimado em torno de 8,3 tCO₂e (toneladas de CO₂ equivalente). Também são geradas

emissões significativas de partículas finas, com um total de 1,9 kg, bem como emissões de óxido de nitrogênio (67,1 kg), hidrocarbonetos não metano (5,1 kg) e óxido de enxofre (10,9 kg). Para três viagens, o valor teria de ser triplicado.

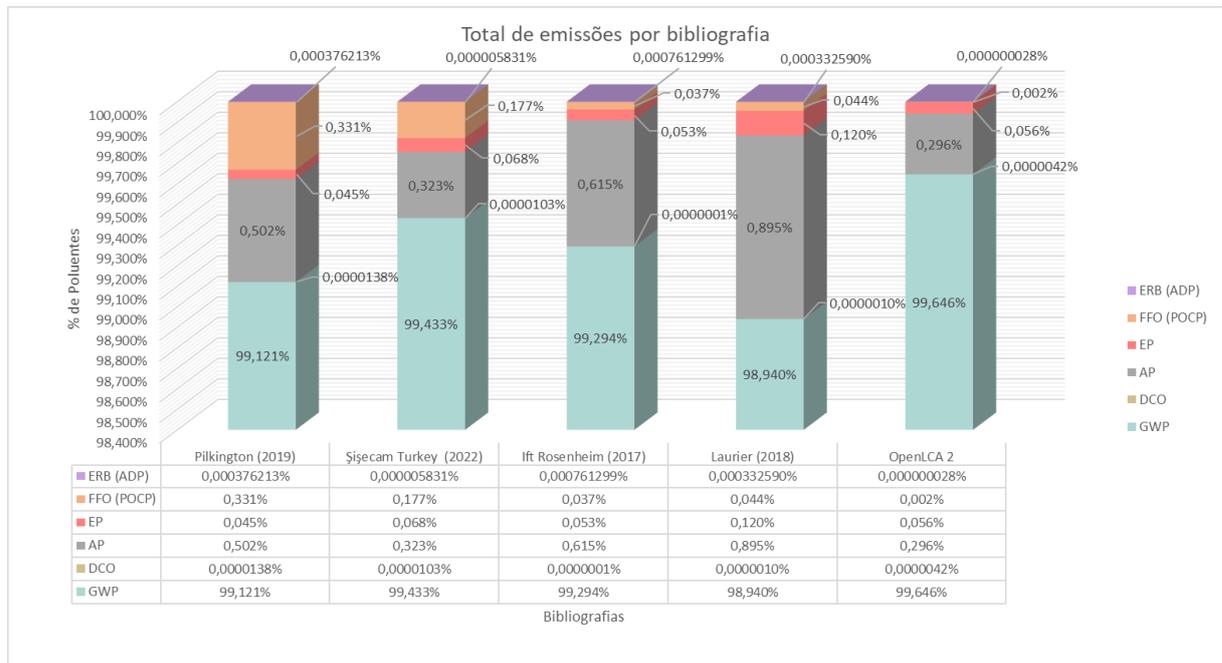
Contudo, como mencionado anteriormente, esse dado permaneceu sem ser aplicado no cálculo das emissões de efluentes. Se essa informação fosse incorporada em uma Declaração Ambiental de Produto pela empresa nacional responsável pela fabricação do vidro, os resultados provavelmente se aproximariam mais da realidade e até mesmo seriam mais satisfatórios em termos de impacto ambiental.

Além disso, a possibilidade de ter uma empresa fabricante de vidro *float* e uma unidade de beneficiamento dentro da própria capital de Rondônia traria benefícios significativos em termos de redução das emissões de CO₂, além da minimização dos danos às estradas e mitigação dos impactos nas mudanças climáticas. Isso ocorreria, pois, evitariam-se longas viagens e quilometragens consideráveis associadas ao transporte rodoviário. Essa configuração de produção mais localizada teria um potencial positivo não apenas em termos de eficiência operacional, mas também na redução do impacto ambiental associado à logística e ao transporte. Portanto, essa é uma consideração importante a ser feita para futuras melhorias na cadeia de produção de vidro laminado.

4.1.8 Resultados gerais

Após a análise minuciosa de cada banco de dados sobre a avaliação do ciclo de vida das quatro empresas mencionadas e a inserção dos dados do estudo de caso no *software Open LCA*, através das tabelas e gráficos anteriores, foi possível fazer uma comparação total de contribuição de cada bibliografia por impacto ambiental. Quando postos os quantitativos de emissões por bibliografia lado a lado, é perceptível as semelhanças e discrepâncias quanto cada categoria apresentada anteriormente.

Figura 24 - Contribuição total de cada bibliografia por impacto ambiental.



Fonte: (Autora, 2023).

Nota-se, na figura 24, que o total de impacto ambiental das seis categorias, gerado por cada empresa, há um destaque no impacto referente à categoria de Mudanças Climáticas (GWP). De forma significativa, todas as bibliografias convergem: de 100% dos impactos gerados, de 98% a 99% são atribuídos à classe GWP, mesmo que os outros dados também apresentem números notáveis. A base no gráfico é fundamentado no percentual de 98% desta categoria, tornando as outras classes mais facilmente visíveis. Em relação aos demais fatores, observa-se uma disparidade significativa nos valores de cada grupo de consequência ambiental. Isso sugere que, no ciclo de vida da construção de uma fachada de vidro laminado no estilo *structural glazing*, os maiores danos à natureza originam-se da emissão de CO₂, com impactos diretos no efeito estufa e no aquecimento global.

A segunda categoria mais presente dentro de todos os cinco estudos é a Acidificação Potencial, que mesmo em porcentagem inferior à GWP, está presente em grande parte do gráfico e é considerada uma grande classe poluente. Isso significa dizer que, mesmo que em menor número que o aquecimento global, a acidificação é um impacto de grande presença na fabricação e beneficiamento do vidro laminado, o que pode desencadear o desequilíbrio químico dos ecossistemas. Todas as literaturas assemelham-se até este ponto em porcentagem de emissões.

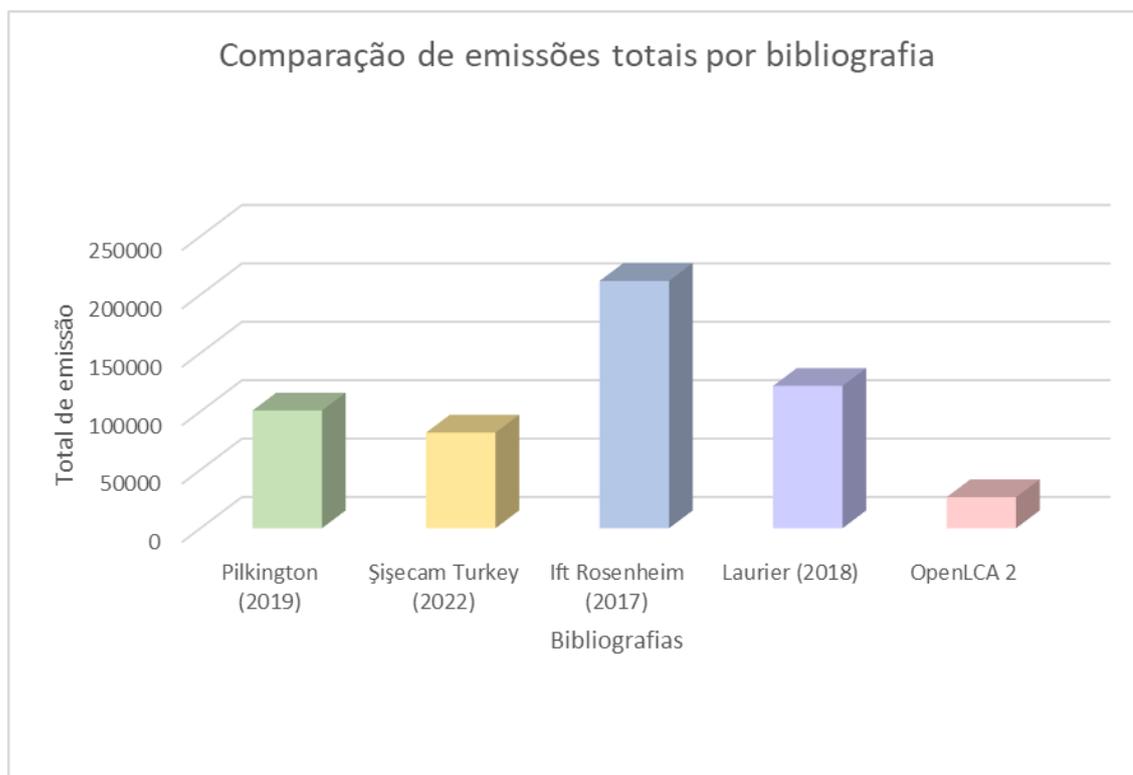
A partir da Formação Fotoquímica de Ozônio, cada banco de dados começa a diferir entre quantitativos. Pilkington (2019) e Şişecam Turkey (2022) apresentam porcentagens de 0,331% e 0,177% nesta categoria em referência ao total de emissões, e seus espaços no gráfico da figura 24 são mais predominantes que os de Ift Rosenheim (2017), Laurier (2018) e do *Open LCA*, que estão classificados abaixo de duas casas decimais em percentual. O resultado do *software* é o único que fica quase imperceptível dentro da figura, devido a seu baixo índice de poluição.

A Eutrofização potencial também ocupa um espaço considerável entre todos os grupos. Laurier (2018) é, entre as comparações, o que mais alimenta o sistema da eutrofização, com 0,120% do total. Pilkington (2019), Şişecam (2022), Ift Rosenheim (2017) e os resultados do *Open LCA* são semelhantes em ocupação do percentual total, indicando 0,045%, 0,068%, 0,053% e 0,056%.

Os valores da categoria de Destruição da Camada de Ozônio e Esgotamento de Recursos Não-Biológicos ocupam um espaço tão pequeno dentro de todas as emissões, que chegam a ser quase invisíveis graficamente, com quantitativos inferiores a 3 casas decimais após o zero. Porém, dentro dos estudos, ainda sim são impactos relevantes, onde o maior emissor, dentro da classe DCO é Pilkington (2019), com 0,0000138%, e também na classe ADP, com resultados de 0,000376%.

Em um balanço geral de qual bibliografia emite maior quantitativo de efluentes, tem-se a figura 25 para exemplificar.

Figura 25 - Comparação das bibliografias em relação ao quantitativo total de emissões.



Fonte: (Autora, 2023).

O estudo revela que a empresa Ift Rosenheim (2017) apresentou uma soma significativamente maior de poluentes em todas as categorias analisadas. Isso sugere a possibilidade de que a corporação talvez não esteja implementando todas as medidas disponíveis para reduzir os danos ao meio ambiente. Por outro lado, os resultados obtidos pelo *software Open LCA* revelaram emissões consideravelmente mais baixas. Isso explica que, devido à constante atualização do banco de dados, a produção das chapas de vidro está sendo conduzida com uma abordagem mais cautelosa em relação aos impactos ambientais.

É crucial destacar que o propósito deste trabalho não é determinar qual empresa emite a maior quantidade de efluentes. As comparações visam estabelecer uma base de dados, levando em consideração as variações de localização. O foco principal é compreender o impacto ambiental da produção de vidro laminado na natureza. Portanto, torna-se imprescindível que cada empresa forneça sua declaração ambiental de produto, incluindo a avaliação do ciclo de vida. Isso permitirá que usuários, outras empresas do setor e pesquisadores interessados na temática tenham acesso ao conhecimento sobre o impacto ambiental do produto utilizado na construção civil.

Em trabalhos sobre Avaliação de Ciclo de Vida, é extremamente recorrente que dados provenientes de outras bases de estudos ou de outras localizações se não nacionais sejam utilizados, devido à carência de informações na esfera nacional. Durante a condução deste estudo de caso, diversas restrições foram identificadas. O principal objetivo era realizar o inventário do ciclo de vida da produção do vidro laminado destinado à aplicação em fachadas do tipo *structural glazing*. Para isso, a intenção era a utilização de bancos de dados nacionais, obtidos a partir de estudos existentes ou por meio de declarações ambientais de produto relacionadas a essa linha de produção. Essa abordagem visava criar uma narrativa em que todos os cálculos fossem fundamentados em dados regionais, refletindo com fidelidade os impactos gerados na construção da fachada da Assembleia Legislativa de Rondônia.

No entanto, como mencionado anteriormente, foram identificadas diversas limitações nos dados disponíveis, as quais devem ser levadas em consideração em estudos futuros. Diante da norma NBR ISO 14044 da ABNT (2009b), não puderam ser concluídas todas as ideias, e muitas lacunas de dados empíricos e informações de pouca consistência foram identificadas. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que a maior parte do banco de dados foi originada da norma europeia EN ISO 14083:2023, com fatores de análise distintos do almejado.

Além disso, não foi viável utilizar dados nacionais para a etapa de beneficiamento, como era a ideia principal. Inicialmente, era planejada a coleta de diversas informações sobre os gastos com produtos e o transporte do material nessa etapa. Contudo, devido à escassez de dados sobre efluentes liberados e estudos mais específicos sobre o produto recebido pelos fabricantes, viu-se necessidade de recorrer a estudos internacionais. Assim, utilizaram-se dados que representam uma média global para essa etapa, obtidos de empresas como Pilkington (2019), Şişecam Turkey (2022), Rosenheim (2017) e Laurier (2018), além do banco de dados da *EcoInvent 3.7* no programa computacional *Open LCA*. Adicionalmente, os dados secundários que foram embasados para complementar o inventário também provieram da base de dados da *EcoInvent 3.7*. Esses dados, em sua maioria, eram internacionais e representavam uma visão global, o que poderia introduzir certa margem de erro nos cálculos relacionados ao transporte.

O estudo de caso sendo a fachada envidraçada do prédio da Assembleia Legislativa de Rondônia foi utilizado para criar-se um contexto do quão negativo ambientalmente este tipo de construção pode ser, principalmente quando inserido no contexto brasileiro. Caso o banco de dados fosse aplicado apenas em 1m², não teriam-se resultados com valores significativos e portanto, pouco impactantes. Sabe-se, então, que anteriormente à construção tipo de edificação,

os fornecedores das fábricas de vidro brasileiras devem apresentar seus respectivos estudos acerca do impacto ambiental gerado, visando uma conscientização de escolha dos engenheiros, arquitetos e clientes que buscam inovações em suas obras.

Cabe ressaltar que, se todas as empresas fabricantes de vidro no Brasil disponibilizassem seus dados sobre emissões de poluentes e transporte de forma mais acessível, o estudo realizado neste trabalho, com o estudo de caso, poderia ter resultados ainda mais realistas e promissores. A ausência desse tipo de estudo, mesmo com a ascensão ininterrupta da tecnologia em fachadas de vidro laminado para aplicação em *structural glazing*, evidencia a baixa preocupação das empresas brasileiras em relação aos impactos ambientais gerados. Isso poderia ser comparado, por exemplo, com fachadas feitas em alvenaria estrutural, para as quais existem diversos estudos disponíveis, os quais também serviram de base e análise deste trabalho.

5. CONCLUSÃO

Este estudo proporcionou uma análise quantitativa e avaliação dos potenciais impactos ambientais associados à produção de vidro laminado incolor, destinado à aplicação em fachadas do tipo *structural glazing* em uma edificação pública localizada em Porto Velho. Este processo foi conduzido mediante a aplicação do método de Avaliação do Ciclo de Vida.

Para proporcionar uma visão abrangente do sistema de produção desse tipo de vidro no país, utilizaram-se dados internacionais secundários para as etapas de fabricação e beneficiamento. Inicialmente, a intenção era empregar informações de uma empresa regional para o beneficiamento, no entanto, devido à escassez de estudos ambientais quantitativos nesse contexto, tais dados não puderam ser aproveitados. Portanto, diversas empresas europeias foram utilizadas como base comparativa, o que permitiu chegar a uma média global para esse segmento industrial. Além disso, foram adotados dados secundários para complementar o inventário do ciclo de vida, obtidos por meio do *software Open LCA*.

O estudo se concentrou na análise das fases de produção, beneficiamento e transporte até o local de instalação. Neste contexto, foi possível concluir que as categorias que apresentaram os maiores impactos ambientais foram mudanças climáticas, acidificação potencial, formação fotoquímica de ozônio e eutrofização potencial. Dentre essas, as mudanças climáticas se destacam, com mais de 98% dos impactos totais atribuídos a essa categoria em todas as fontes analisadas. Este alto impacto é principalmente devido às emissões associadas à produção do vidro, que envolvem a extração da matéria-prima e o tipo de energia utilizada, que, neste estudo, considerou o uso de combustíveis fósseis. Vale ressaltar que se fossem aplicados os dados de consumo de energia a nível nacional, muitas das emissões analisadas poderiam ser substancialmente reduzidas, graças à matriz energética do Brasil, que emprega fontes renováveis.

No que diz respeito ao consumo de água, a empresa regional estudada implementava um eficiente gerenciamento do recurso, reutilizando a água no processo por até seis meses e posteriormente destinando-a à limpeza dos escritórios e pátios. Acredita-se que as demais empresas internacionais também adotem práticas similares. Caso contrário, haveria um impacto significativo na depleção de água, um aspecto não abordado pela Avaliação do Ciclo de Vida do método CML, que orientou este estudo.

Cabe salientar que apenas as categorias de destruição da camada de ozônio e esgotamento de recursos não-biológicos apresentaram impactos relativamente baixos, mesmo em uma produção em larga escala, como é o caso da construção da Assembleia Legislativa de Rondônia.

Embora os estudos comparativos tenham apresentado discrepâncias nos resultados de impacto ambiental, como a Ift Rosenheim (2017) que registrou a maior soma de poluentes, e o *software* indicando que o mesmo processo produtivo poderia reduzir em até três vezes as emissões de efluentes em comparação à empresa citada, todos os dados apresentam pontos de convergência. Essas outras divergências podem estar relacionadas à limitação de dados disponíveis, principalmente em relação aos produtos utilizados durante o processo, ao tipo de energia empregada, à distância percorrida no transporte e à falta de informações detalhadas sobre os processos e gastos.

Portanto, otimizações nos processos, eficiência energética, minimização do consumo de água através do reuso contínuo e alternativas mais sustentáveis de transporte, como a instalação de fábricas mais próximas das cidades grandes e também suas beneficiadoras, surgem como opções viáveis para reduzir os impactos provenientes dessas fontes. Além disso, instigar o mercado brasileiro a adotar Declarações Ambientais de Produto pode proporcionar uma compreensão mais precisa da magnitude dos impactos da etapa de produção.

Recomenda-se, para futuras pesquisas, uma análise mais segura acerca da veracidade e qualidade referente a esses dados. Isso tudo seria feito para que se tivesse uma maior certeza acerca dos danos ao meio ambiente e possíveis soluções. Além disso, é crucial aprimorar o inventário direcionado à produção de vidro float laminado nacional, incluindo fontes de energia, transporte e materiais contemplados. Outro método para pesquisas futuras é investigar outras edificações brasileiras, tanto com fachadas envidraçadas quanto de outros materiais como alvenaria, madeira e entre outros. Isso permitiria uma comparação abrangente dos sistemas e a identificação daqueles que são mais benéficos ambientalmente e socialmente.

Por fim, é crucial ressaltar que as avaliações de ciclo de vida precisam abranger não apenas os aspectos ambientais, mas também os pilares econômicos e sociais da sustentabilidade. Dessa forma, consegue-se não só minimizar os impactos, mas também garantir que as soluções sejam economicamente viáveis e promovam o bem-estar dos usuários. Além disso, é fundamental conscientizar sobre a aplicação de tecnologias, garantindo que se compreenda plenamente o tipo de produto utilizado e seus efeitos na sociedade como um todo.

Aconselha-se, além de tudo, que em estudos futuros seja promovida a ACV abrangente, contemplando todas as fases de produção do material fabricado em território brasileiro. Isso permitirá uma compreensão mais profunda e significativa dos impactos ambientais associados a cada etapa do processo produtivo, fornecendo percepções valiosas para aprimoramentos nos termos da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAVIDRO. **Revista O Vidro Plano: Vidro Duplo (Insulado)**. Retrieved from ABRAVIDRO: <https://abravidro.org.br/vidros/vidro-duplo-insulado>. 16 de Agosto de 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14698: Vidro Temperado**. Rio de Janeiro: 2001.

AFLALO. **Citicorp Center**. Retrieved from AFLALO & GASPERINI ARQUITETOS: <https://aflalogasperini.com.br/citicorp-center/>. 2020.

AFLALO. **Berrini One**. Retrieved from AFLALO & GASPERINI ARQUITETOS: Disponível em <<https://aflalogasperini.com.br/berrini-one/>>. 2021

AKTAS, B., BILEC, & MELISSA, M. (2011). **Impact of lifetime on US residential building LCA results**. The International Journal of Life Cycle Assessment. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0363-x>. 2011.

ANAVIDRO. **Você conhece o vidro insulado?** Retrieved from Associação Nacional de Vidraçarias : Disponível em <<https://www.anavidro.com.br/voce-conhece-o-vidro-insulado/>>. 2013.

ARRUDA, T. S. **Estudos de Modalidades para a Execução de Fachada Cortina**. Monografia. Departamento de Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Instituto Politécnico da UFRJ. 2010.

BANDEIRANTES, C. **Vidro Laminado**. Retrieved from Casa Bandeirantes: Disponível em: <<https://casasbandeirantes.com.br/vidros/>>. 2018.

BATISTA, T. S. **REVESTIMENTO EXTERNO EM PELE DE VIDRO UTILIZANDO O SISTEMA DE FACHADA UNITIZADA**. Trabalho de Conclusão de Curso. Recife, Pernambuco, Brasil. 2013.

BELMETAL. **Catálogo Fachada Pele de Vidro e Structural Glazing**. São Paulo, São Paulo, Brasil. Retrieved Abril 08, 2023, disponível em: <https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/belmetal/catalogo_atlanta.pdf>. 2017.

BLINDEX. **O que é vidro temperado Blindex?** Retrieved from Blindex Vidros: Disponível em: <<https://www.blindex.com.br/sobre-a-blindex/historia-do-vidro/o-que-e-vidro-temperado-blindex#>>>. 2013.

BRUGNERA, R. R. **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil**. Tese de doutorado, USP. São Carlos, São Paulo, Brasil. 2018.

BS – British standard. EN 15804:2012+A2:2019. **Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products**. 2019.

BUENO, C. **AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**. Tese de Doutorado. São Carlos, São Paulo, Brasil. 2014.

CARDOSO, H. J., & CARNEIRO, R. P. **Monitoramento de Fachada Envidraçada**. Publicação de artigo. Goiás, Brasil. 2020.

CARDOSO, I. M. **FACHADA: INFILTRAÇÕES DE ÁGUA EM UM EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTOS DE GOIÂNIA - GO**. Tese de conclusão de curso. Goiás, Brasil. 2017.

CARVALO, T. N. **A Avaliação do Ciclo de Vida e a arquitetura: metodologia de ACV como ferramenta de decisão de projeto**. IX Encontro nacional, VII encontro latino-americano, II encontro latino americano e europeu sobre edificações sustentáveis. São Leopoldo, Brasil. 2017.

CASELLI, C. K. **Fachada de edifício residencial em vidro no século XXI: clima, conforto e conservação de energia**. São Paulo, São Paulo, Brasil. 2011.

CITHERLET, S., GUGLIELMO, F. D., & GAY, J. **WINDOW AND ADVANCED GLAZING SYSTEMS LIFE CYCLE ASSESMENT**. Energy and Buildings. Lausanne, Suíça. 2000.

COSTA, S. F., & KOS, D. **Aplicação Da Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida Energético a uma Residência em Belém-Pa**. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Distrito Federal, Brasília, Brasil. 2021.

DALMORA, G., LUZZI, K., & HEMKEMEIER, M. **A contribuição da análise do ciclo de vida (ACV) para a minimização dos impactos ambientais de processos produtivos: uma abordagem teórica.** RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR. Passo Fundo, Brasil: Universidade de Passo Fundo. 2023.

DALLAROSA, J. B. **Estudo da formação e dispersão de ozônio troposférico em áreas de atividade de processamento de carvão aplicando modelos numéricos.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. 2005.

ECOINVENT. **The Ecoinvent DataBase.** [S. l.], 21 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/database/database.html>>. Acesso em 16 de agosto de 2023.

EN ISO 14083:2023. Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. 1ª edição, 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Life Cycle Assessment of PVC and of Principal Competing Materials.** Abril 12, 2023, disponível em: <https://pure.au.dk/portal/files/13386408/pvc-final_report_lca.pdf>. 2004.

FARIAS, E., OLIVEIRA, R., SILVA, M. M., & MELO, T. A. **Avaliação Do Ciclo De Vida Da Construção Civil Habitacional Brasileira.** Research, Society and Development. Paraíba, Brasil. 2022.

FIGUEROLA, V. **Structural glazing: caracterizado pela colagem de vidros em caixilhos de alumínio, o sistema requer cuidados de projeto e instalação para bom desempenho e segurança.** Revista Técnica, 30-34. São Paulo, Brasil. 2005.

GREENDELTA. Open LCA. Disponível em: <<http://www.openlca.org>>. 2023.

GUARDIAN GLASS. **SunGuard Solar Silver 20.** Retirado de Guardian Glass: Disponível em: <<https://www.guardianglass.com/la/pt/our-glass/sunguard-solar/silver-20>>. 2023.

HALDIMANN, M., LUIBLE, A., & OVEREND, M. **Structural use of Glass.** Zurique, Suíça. 2008.

HENRIQUES, P. **Comportamento ao fogo do vidro estrutural.** Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aveiro: Universidade de Aveiro. 2010.

IFT Rosenheim GmbH. **Environmental Product Declaration: Flat Glass, toughened safety glass and laminated safety glass.** Okalux Glastechnik GmbH. 2017.

LARUCCIA, M. M. **Sustentabilidade e Impactos Ambientais da Construção Civil**. REVISTA ENIAC PESQUISA. Acesso em 11 de abril , 2023, disponível em: <<https://doi.org/10.22567/rep.v3i1.124>>. 2014.

Laurier Glass LTD. **Environmental Product Declaration: Monolithic Glass, Laminated Glass and Sealed Units**. 2018.

LIBRELOTTO, D., & JALALI, S. **Aplicação de uma Ferramenta de Análise do Ciclo de Vida em Edificações Residenciais - Estudos de Caso**. Artigo para Universidade do Minho. Portugal. 2008.

MARCAL, L. M. et al. **Fundamentos da Análise do Ciclo de Vida**. Salvador, Bahia, Brasil: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIII. Acesso em 10 de abril, 2023, disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_WIC_185_055_22686.pdf>. 2013.

MORAIS, L. T. **SkyGlass Canela: uma das maiores plataformas de vidro no mundo é no Brasil**. Disponível em: <<https://turismo.ig.com.br/destinos-nacionais/2021-08-13/skyglass-canela-plataforma-vidro-mais-alta-america-latina.html>>. 2021.

MROVEH, U.-M., ESKOLA, P., & LAINE-YLIJOKI, J. **Life cycle impacts of the use of industrial by products in road and earth construction**. Waste Management. 2001.

PEREIRA, I. L. **Análise da Execução de uma Fachada em Pele de Vidro**. João Pessoa, Paraíba, Brasil. 2022.

PEREIRA, S. M. **Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro**. Lisboa, Portugal. 2012.

PINHEIRO, F. **EVOLUÇÃO DO USO DO VIDRO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL**. Itatiba, Brasil. 2007.

Pilkington Group Limited. **Environmental Product Declaration: Laminated Float Glass**. Part of the NSG Group. 2019.

RABAÇA, G. V. **ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA FASE OPERACIONAL DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL SUSTENTÁVEL**. Tese de Conclusão de Curso. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 2015.

REBUFFO, P., & REDAELLI, C. **Structural Glazing: Fachadas de Vidro do Momento**. São Paulo, Brasil: Finestra. 1995.

RICALDES, J. **Projeto Humanarte: Valores Humanos Através da Arte**. Disponível em Humanarte: <<https://blog.humanarte.net/2018/08/saint-chapelle-paris.html>>. 2020.

Şişecam Turkey. **Environmental Product Declaration: Laminated Glass**. EPD Turkey. 2022.

SAINT-GOBAIN, G. **Manual do vidro**. Paris. 2000.

SANTOS, L. **Fachadas de Alumínio, como alcançar um desempenho eficiente**. Contramarco e Companhia, 26-40. De Contramarco e Companhia. 2005.

SANTOS, M. M. **Análise Crítica da Execução de Uma Fachada de Vidro**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil. Porto Alegre, Brasil. 2013.

SCHITTICH, C. **Glass Construction Manual**. Detail. Munique. 2007.

SILVA, J. P. **VIDRO ESTRUTURAL: CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E ESTUDO DE CASO**. Trabalho de Conclusão de Curso. João Pessoa, Paraíba, Brasil. 2017.

SOARES, S. R., SOUZA, D. M., PEREIRA, S. W. **A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil**. Santa Catarina, Brasil. 2004.

SOUTO, E. **Skyglass – Maior plataforma de vidro do mundo está no Brasil**. Disponível em: <<https://papodearquitecto.com.br/skyglass-maior-plataforma-de-vidro-do-mundo-esta-no-brasil/>>. 2021.

TIGRE, A. L. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS COM FACHADA DE VIDRO**. Curitiba, Brasil. 2016.

UFSC. **Avaliação do Ciclo de Vida do Vidro**. Acesso em 13 de abril de 2023, Disponível em: <<https://materioteca.paginas.ufsc.br/vidros/>>. 2016.

VALARINHO, L. G. **Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP**. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

VARGAS, G. S. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS VEDAÇÕES EXTERNAS DE UMA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL: ESTUDO ENTRE ALVENARIA E LIGHT STEEL FRAME. Caxias do Sul, Brasil. 2021.