



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG) /
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFCAT) em implantação
FACULDADE DE ENGENHARIA (FENG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)

RIGLEY CÉSAR MATIAS GONÇALVES

**IMPACTOS AMBIENTAIS PROVENIENTES DO TRANSPORTE NA AVALIAÇÃO
DO CICLO DE VIDA (ACV) DE TUBULAÇÕES EM PVC E PEX UTILIZADAS
NA EXECUÇÃO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA FRIA**

CATALÃO

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

RIGLEY CÉSAR MATIAS GONÇALVES

3. Título do trabalho

IMPACTOS AMBIENTAIS PROVENIENTES DO TRANSPORTE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE TUBULAÇÕES EM PVC E PEX UTILIZADAS NA EXECUÇÃO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA FRIA

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Heber Martins De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 06/07/2023, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **RIGLEY CESAR MATIAS GONCALVES, Discente**, em 06/07/2023, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3874240** e o código CRC **DF99FFDF**.

RIGLEY CÉSAR MATIAS GONÇALVES

**IMPACTOS AMBIENTAIS PROVENIENTES DO TRANSPORTE NA AVALIAÇÃO
DO CICLO DE VIDA (ACV) DE TUBULAÇÕES EM PVC E PEX UTILIZADAS
NA EXECUÇÃO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA FRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal de Goiás (UFG) / Universidade Federal de Catalão (UFCAT) em implantação, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Construção Civil. Linha de pesquisa: Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade na Construção Civil.

Orientador: Professor Dr. Heber Martins de Paula

CATALÃO

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Gonçalves, Rigley César Matias
IMPACTOS AMBIENTAIS PROVENIENTES DO TRANSPORTE
NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE TUBULAÇÕES EM
PVC E PEX UTILIZADAS NA EXECUÇÃO DE SISTEMAS PREDIAIS
DE ÁGUA FRIA / Rigley César Matias Gonçalves. - 2023.
98, f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Heber Martins de Paula.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão,
Faculdade de Engenharia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Catalão, 2023.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras,
lista de tabelas.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Transporte. 3. Tubulações de PVC.
4. Tubulações de PEX. 5. Sistemas prediais. I. Paula, Heber Martins
de, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 13 da sessão de Defesa de Dissertação de **RIGLEY CÉSAR MATIAS GONÇALVES**, que confere o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

"Banca Examinadora de Qualificação/Defesa Pública de Dissertação/Tese realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo: Art. 2º A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."

No trigésimo primeiro dia do mês de maio de dois mil e vinte e três a partir das dez horas e trinta minutos, na sala virtual <<https://meet.google.com/evh-batf-fkm>>, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada "**IMPACTOS AMBIENTAIS PROVENIENTES DO TRANSPORTE NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE TUBULAÇÕES EM PVC E PEX UTILIZADAS NA EXECUÇÃO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ÁGUA FRIA**" nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação stricto sensu em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses (BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho (UFG), outra no corpo do texto (UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Professor Doutor HEBER MARTINS DE PAULA (PPGEC/UFCAT)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadores: **Professor Doutor RICARDO PRADO ABREU REIS (EECA/UFG)**, membro titular externo; e **Professora Doutora ANDREZA KALBUSCH (Departamento de Engenharia Civil CCT/UDESC)**, membro titular externo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Heber Martins de Paula, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos trinta e um dias do mês de maio de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Heber Martins De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 31/05/2023, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreza Kalbusch, Usuário Externo**, em 31/05/2023, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Prado Abreu Reis, Professor do Magistério Superior**, em 31/05/2023, às 12:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3739323** e o código CRC **D3883EBC**.

Referência: Processo nº 23070.026759/2023-99

SEI nº 3739323

RESUMO

GONÇALVES, R. C. M. **Impactos ambientais provenientes do transporte na avaliação do ciclo de vida (ACV) de tubulações em PVC e PEX utilizadas na execução de sistemas prediais de água fria.** Catalão. Dissertação (Mestrado) – Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Catalão, 2023.

O setor de transportes e a construção civil são exemplos de ramos da economia que, ao mesmo tempo em que se expandem, aumentam suas participações nas emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Um artifício que pode contribuir com a melhoria desse panorama é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), metodologia que evidencia os possíveis impactos ambientais de atividades e/ou produtos e serve de parâmetro para determinar pontos que podem contribuir com a sustentabilidade do processo em estudo. Porém, apesar de ser uma ferramenta eficiente, grande parte das ACVs tem ignorado as influências do transporte, ato que pode resultar em dados equivocados, principalmente em países deficientes de infraestrutura e equidade tecnológica, como o Brasil. Ainda, é observada certa carência de ACVs para produtos de sistemas prediais, principalmente aquelas em que se compara um material com o outro. Nesse contexto, objetiva-se detectar qual a participação da logística de distribuição na liberação de poluentes atmosféricos no ciclo de vida de tubulações em PVC e PEX, dois tipos de materiais que podem ser empregados na execução de sistemas prediais de água fria. Para tal será avaliado o transporte rodoviário entre as fábricas brasileiras existentes e cinco cidades estratégicas do país, cada qual em uma região, fazendo o uso das bases de dados *Ecoinvent v3.5* e *Industry Data v2.0* e software de modelagem *OpenLCA*. Foi diagnosticado que o transporte tem uma participação variada nos índices de emissões de poluentes dentro do ciclo de vida das tubulações, a depender de fatores como disponibilidade de infraestrutura e tecnologia para montagens de fábricas próximas são locais de consumo. O transporte de PEX na região norte atingiu mais de 75% das emissões de dióxido de carbono do ciclo de vida do material, enquanto que na região sudeste esse percentual não ultrapassou 3% para ambas as tubulações. Ainda foi identificado que as tubulações em PEX mantêm uma conduta ambiental mais ecológica nos casos onde as distâncias de transporte para a logística de distribuição são menores ou semelhantes às do PVC e este, por sua vez, só é menos poluente quando sua trajetória de locomoção se mostrou 76% inferior à do PEX.

Palavras-chaves: Avaliação do ciclo de vida, transporte, tubulações de PVC, tubulações de PEX, sistemas prediais.

ABSTRACT

GONÇALVES, R. C. M. **Impactos ambientais provenientes do transporte na avaliação do ciclo de vida (ACV) de tubulações em PVC e PEX utilizadas na execução de sistemas prediais de água fria.** Catalão. Dissertação (Mestrado) – Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Catalão, 2023.

The transport sector and civil construction are examples of branches of the economy that, while expanding, increase their share of greenhouse gas (GHG) emissions into the atmosphere. An artifact that can contribute to improving this scenario is the Life Cycle Assessment (LCA), a methodology that highlights the possible environmental impacts of activities and/or products and serves as a parameter to determine points that can contribute to the sustainability of the process in question. study. However, despite being an efficient tool, most LCAs have ignored the influences of transport, an act that can result in misleading data, especially in countries with poor infrastructure and technological equity, such as Brazil. Even so, a certain lack of LCAs is observed for building systems products, especially those where one material is compared to another. In this context, the objective is to detect the participation of distribution logistics in the release of atmospheric pollutants in the life cycle of PVC and PEX pipes, two types of materials that can be used in the execution of cold water systems in buildings. To this end, road transport between existing Brazilian factories and five strategic cities in the country, each in a different region, will be evaluated, using the Ecoinvent v3.5 and Industry Data v2.0 databases and OpenLCA modeling software. It was thought that transport has a variable participation in the pollutant emission rates within the life cycle of the pipes, depending on factors such as availability of infrastructure and technology for assembling factories close to consumption sites. PEX in the north region reached more than 75% of the material's life cycle carbon emissions, while in the southeast region this percentage did not exceed 3% for both pipelines. It was also identified that PEX pipes maintain a more ecological environmental behavior in cases where transport distances for distribution logistics are smaller or similar to those of PVC and this, in turn, is only less polluting when its locomotion path is shorter. showed 76% lower than that of PEX.

Keywords: *Life cycle assessment, transportation, PVC piping, PEX piping, building systems.*

*Aos meus grandiosos pais, César e Jilda, minha
amada irmã, Laressa, e minha maravilhosa
namorada, Paula.*

NOTA

Os Programas de Pós-Graduação stricto sensu em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, continuam provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me dar saúde, determinação e perseverança para atingir meus objetivos e propósitos.

Saúdo minha família, nos papéis dos meus pais, César e Jailda, e minha irmã, Laressa, por sempre estar presente, colaborar com a minha jornada em busca de novos conhecimentos, zelando por uma educação gratuita e de qualidade.

Reverencio o primordial incentivo da minha namorada, Paula, sempre ao meu lado me encorajando e oferecendo cuidado nos momentos de dificuldade, além de ser minha maior fonte de inspiração e motivação.

Agradeço o meu orientador, Prof. Dr. Heber Martins, pela paciência e por ser um alicerce no desenvolvimento desse trabalho, direcionando e clareando o caminho até o produto final.

Reconheço o papel fundamental dos meus amigos que contribuíram para o desenvolvimento dessa dissertação, seja de forma direta, colaborando com o fornecimento de dados e informações, ou de forma indireta, servindo de válvulas de escape em situações adversidades.

Por fim, exalto todos os profissionais da educação que já passaram pela minha vida até hoje, eu não estaria aqui se não fosse por professores comprometidos com a arte de ensinar. Com toda a certeza esse trabalho tem um pouco da contribuição vocês.

“O indivíduo só poderá agir na medida em que aprender a conhecer o contexto em que está inserido, a saber quais são suas origens e as condições de que depende.”

- Émile Durkheim

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivos	19
1.1.1. Objetivos Específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. O mercado das tubulações de plástico	20
2.2. Tubulações em policloreto de vinila (PVC)	22
2.3. Tubulações em polietileno reticulado (PEX)	26
2.4. ACV no contexto de sistemas prediais	28
2.5. Sistema de transporte brasileiro e sua relação com o meio ambiente	29
2.6. Influências do transporte em ACVs de materiais da construção civil	32
2.7. Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	33
2.7.1. Origem da ACV	34
2.7.2. Metodologia da ACV	37
2.7.3. Definição de objetivo e escopo.....	38
2.7.4. Unidade funcional.....	38
2.7.5. Fronteiras do sistema	39
2.7.6. Softwares e Base de Dados	40
2.7.7. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).....	42
2.7.8. Avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV)	43
2.7.9. Interpretação.....	46
3. METODOLOGIA E FORMA DE ANÁLISE DOS DADOS	46
3.1. Delineamento da pesquisa	47
3.2. Compreensão do problema.....	48
3.3. Determinação dos locais de estudo	48
3.4. Levantamento de fábricas de PEX e PVC.....	52
3.5. Definição dos parâmetros para a elaboração da ACV	57
3.6. Levantamento dos impactos ambientais	63
4. RESULTADOS.....	63
4.1. Cenário I – Parauapebas/PA.....	65
4.2. Cenário II – Catalão/GO	69
4.3. Cenário III – Parnaíba/PI	73
4.4. Cenário IV – Caxias do Sul/RS	77

4.5. Cenário V – Osasco/SP.....	81
4.6. Resumo das análises	83
5. CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Panorama mundial da fabricação de plásticos.	21
Figura 2 – a) Principais aplicações do PVC no Brasil por setor da economia; b) Principais aplicações do PVC no Brasil por mercado.	23
Figura 3 – Estimativa da vida útil em serviço de produtos de PVC.	24
Figura 4 – Diagrama esquemático da fase de produção de tubulação de PVC.	25
Figura 5 - Diagrama esquemático da fase de produção de tubulação de PEX pelo método de Engel.	27
Figura 6 – Sistema de transporte brasileiro comparado com outras regiões.	30
Figura 7 – Avaliação da qualidade das rodovias brasileiras.	31
Figura 8 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida.	38
Figura 9 - Procedimento para a elaboração do ICV.	42
Figura 10 - Elementos da AICV.	43
Figura 11 – Delineamento geral da pesquisa.	47
Figura 12 – Cenários de Estudo.	49
Figura 13 – Localização da cidade de Parauapebas/PA (Cenário I).	49
Figura 14 – Localização da cidade de Catalão/GO (Cenário II).	50
Figura 15 - Localização da cidade de Parnaíba/PI (Cenário III).	51
Figura 16 - Localização da cidade de Caxias do Sul/RS (Cenário IV).	51
Figura 17 - Localização da cidade de Osasco/SP (Cenário V).	52
Figura 18 – Localização das fábricas no país.	53
Figura 19 – Modelo de veículo e disposição das tubulações para carga.	54
Figura 20 – a) distância percorrida pelo PVC e b) distância percorrida pelo PEX.	55
Figura 21 – Trajetos para cada cenário de estudo.	56
Figura 22 – Ciclo de vida de tubulações de água fria.	57
Figura 23 – Fronteira da ACV estudada.	58
Figura 24 – a) tubo PVC; b) tubo PEX.	58
Figura 25 – Sistema de produto: tubo PVC.	59
Figura 26 – Sistema de produto: tubo PEX.	60
Figura 27 – Esquema de funcionamento do <i>software OpenLCA</i>	61
Figura 28 - ACV sem considerar o transporte.	64
Figura 29 - Resultado da ACV do cenário I.	66

Figura 30 – Participação do transporte na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário I.	67
Figura 31 – Alternativa de distribuição de PVC para o cenário I.....	68
Figura 32 – Percentual de emissões de CO ₂ do transporte por intermodalidade em relação às emissões do transporte somente por rodovia.....	68
Figura 33 - Resultado da ACV do cenário II.....	70
Figura 34 - Participação do transporte na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário II.	70
Figura 35 – Malha ferroviária da FCA.....	71
Figura 36 – Percurso por ferrovia.....	72
Figura 37 – Comparação entre o transporte ferroviário e rodoviário na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário II.....	73
Figura 38 - Resultado da ACV do cenário III.....	74
Figura 39 - Participação do transporte na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário III.....	75
Figura 40 – Posicionamento do centro de distribuição na cidade de Juazeiro do Norte.....	76
Figura 41 – Trajetórias com o CDA.....	76
Figura 42 – Cálculo da distância percorrida com a implantação do CDA.....	77
Figura 43 - Resultado da ACV do cenário IV.....	78
Figura 44 - Participação do transporte na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário IV.....	79
Figura 45 – Trajetória do transporte por cabotagem.....	80
Figura 46 – Comparação do percentual de emissão de CO ₂	81
Figura 47 - Resultado da ACV do cenário V.....	82
Figura 48 - Participação do transporte na liberação de CO ₂ nos ciclos de vida para o Cenário V.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de exportação de transformados de plástico no Brasil.....	21
Tabela 2 - Percentual do transporte em relação às emissões totais.	33
Tabela 3 - Softwares mais utilizados para elaboração de ACVs.	40
Tabela 4 - Maiores bases de dados para desenvolvimento de ACV e suas vertentes.	41
Tabela 5 – Cenários de estudo.	48
Tabela 6 – Fábricas mais próximas e distâncias de transporte.	55
Tabela 7 - Propriedades das tubulações estudadas.	58
Tabela 8 - Composição dos tubos de PVC em percentual de massa (kg).	61
Tabela 9 – Composição dos tubos de PEX em percentual de massa (kg).....	62
Tabela 10 - Categorias de impactos a serem consideradas na ACV.	62
Tabela 11 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário I.	66
Tabela 12 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental do PVC e PEX para o cenário I utilizando a intermodalidade de transporte.	69
Tabela 13 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário II.	70
Tabela 14 – Distâncias de transporte por ferrovia.	72
Tabela 15 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário III.	74
Tabela 16 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário IV.	78
Tabela 17 – Distâncias por modalidade de transporte.	80
Tabela 18 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário V.	82
Tabela 19 - Relação entre as distâncias e resultados para cada cenário.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais marcos da ACV no Brasil.	35
Quadro 2 - Categorias de impacto e suas características.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

20a	Efeitos em 20 anos
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos impactos do ciclo de vida
ARPA	Análise de Recursos e Perfil Ambiental
C ₂ H ₄	Monômero de eteno
CDA	Centro de Distribuição Avançado
CIS	Comunidade dos Estados Independentes
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de Carbono
DALYS	Disability Adjusted Life Years
DF	Distrito Federal
Dist _{PEX}	Distância de transporte do PEX
Dist _{PVC}	Distância de transporte do PVC
EPA	Environmental Protection Agency
ES	Espírito Santo
FAETP	Ecotoxicidade Aquática de Água Doce
FCA	Ferrovias Centro Atlântica
FSETP	Ecotoxicidade de Sedimentos de Água Doce
GANAP	Grupo de Apoio à Normalização Ambiental
GEE	Gases do Efeito Estufa
GO	Goiás
GWP	Global warming potential
HTP	Toxicidade Humana
ICV	Análise de inventário do ciclo de vida
IDESDE	Índice de Desenvolvimento Socioeconômico
INECLAC	Natural Resources and Infrastructure
ISSO	Organização Internacional para Padronização
MAETP	Ecotoxicidade Aquática Marinha
MRI	Midwest Research Institute

MSETP	Ecotoxicidade de Sedimento Marinho
NAFTA	Acordo de Livre-Comércio da América do Norte
ODP	Depleção de ozônio estratosférico
PA	Pará
PBQP-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat
PE	Pernambuco
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEX	Polietileno Reticulado
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
PSQ	Programa Setorial da Qualidade
PVC	Policloreto de Vinila
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SEST	Serviço Social do Transporte e Serviço Nacional de Aprendizagem do
SENAT	Transporte
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
SO2-Eq	Dióxido de enxofre equivalente
SP	São Paulo
TAETP	Ecotoxicidade terrestre
TKU	Tonelada por quilômetro útil
UNEP	United Nations Environmental Programme
VUP	Vida útil de projeto

1. INTRODUÇÃO

O Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2022) apurou que no ano de 2020 o setor de transportes representou 33% do gasto final de energia no Brasil, sendo a movimentação de cargas por rodovias o principal fator que contribuiu com esse consumo. Aliado a esse cenário foi observado que o número de caminhões em atividade teve uma evolução de 3,5% ao ano entre 2005 e 2018 (SEST SENAT, 2022).

Apesar do crescimento de veículos pesados para a movimentação de mercadorias, a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2020) apontou o transporte como responsável por 22,8% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no território brasileiro, sendo a categoria rodoviária o tipo de modal que mais libera poluições ao meio ambiente. Ainda, Simão *et al.* (2022) afirmaram que a logística interna de transporte de cargas no Brasil é hegemonicamente realizada por rodovias e que, a carga transportada inclui, frequentemente, materiais para obras e reformas.

Neste mesmo pensamento encontra-se o setor da construção civil, conhecido por ser um dos que mais oferece vagas de emprego e potencializa o desenvolvimento econômico do Brasil, ao mesmo tempo em que impacta negativamente, em grande escala, o meio ambiente, principalmente na emissão gases do efeito estufa (GEE), gasto energético e utilização de recursos não renováveis (SILVA, 2016).

Desta forma, é observado que tanto o setor de transportes quanto a indústria da construção civil comungam da ideia de que o desenvolvimento econômico anda na contramão da preservação do meio ambiente, contradizendo os princípios do desenvolvimento sustentável e, por esse motivo, carecem de discussões que prezam pela sustentabilidade e busquem melhorias em seus processos (CARVALHO, 2016).

Uma estratégia utilizada para analisar o comportamento ambiental de atividades e materiais é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Essa ferramenta surgiu nos Estados Unidos na década de 1970, momento em que a crise do petróleo obrigava empresários a repensarem o uso dos recursos naturais (COLEHO FILHO *et al.*, 2016). De lá para cá, juntamente com o desenvolvimento de novas legislações ambientais, a ACV veio se popularizando e passando por aperfeiçoamentos, o que resultou em uma eficiente estratégia na busca pela melhoria do desempenho produtivo e ambiental de procedimentos industriais.

Apesar de ser um estudo imprescindível para os avanços do desenvolvimento sustentável, muitas pesquisas de ACV costumam desconsiderar o transporte em suas análises, sob a justificativa de que os impactos gerados pela necessidade de mobilidade de mercadorias são desprezíveis quando comparados com os resultados das outras fases do ciclo de vida, tendo em vista as poucas distâncias de deslocamento (QUDDUS *et al.*, 2022; MONTEIRO *et al.*, 2021; CABEZA *et al.*, 2014). No entanto, tratando-se de países com grandes extensões territoriais e dependência de uma única modalidade de movimentação de cargas, como o caso do Brasil, Caldas e Sposto (2017) pontuam que o transporte pode apresentar parcelas relevantes na liberação de gases poluentes dentro dessa metodologia de análise do comportamento ambiental.

Alguns dos estudos que não ignoraram as influências do transporte na ACV de materiais de construção civil encontraram percentuais variados da participação desse fator na liberação de CO₂. A ACV de Quinteiro *et al.* (2022) diagnosticou que o transporte libera até 13% do CO₂ eq na fabricação de telhas térmicas na cidade de Aveiro, em Portugal. Taborianski e Prado (2012), analisando o comportamento ambiental de fachadas de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, identificaram que até 14,8% do CO₂ eq de todo o ciclo de vida é oriundo da fase de transporte; em duas avaliações de sistemas de vedação em *steel frame*, ambas no entorno do Distrito Federal (DF). Nabut Neto (2011) e Palácio (2013) encontraram percentuais de 4% e 15% de CO₂, respectivamente, proveniente do transporte de cargas; enquanto Gong *et al.* (2012) constataram que o transporte necessário para a construção de edifícios residenciais na capital da China pode corresponder a 11% da emissão de dióxido de carbono do ciclo de vida de todo o empreendimento.

Embora a ACV seja uma ferramenta consolidada na indústria da construção civil, é observada uma carência de estudos voltados para a análise comparativa entre materiais hidráulicos, principalmente entre tubulações de sistemas de água fria de policloreto de vinila (PVC) e polietileno reticulado (PEX), dois dos principais tipos de materiais desenvolvidos pela indústria brasileira do plástico (ABIPLAST, 2022) e amplamente empregados na execução de redes de água para consumo humano.

Dentre as poucas avaliações identificadas nesse contexto destacam-se as pesquisas de Marson *et al.* (2021), que abordou os impactos ambientais na fabricação de tubos de PVC na Europa, identificando uma emissão de 2,52 kg CO₂ eq no processo produtivo dos tubos de água; de Xiong *et al.* (2020), que compararam a conduta ambiental de tubulações em PVC, aço

galvanizado e cobre para sistemas de abastecimento e drenagem em edifícios chineses, diagnosticando que as redes executadas em PVC apresentam 86% de redução do consumo de energia, quando comparado com tubos de aço galvanizado, e 91%, em relação às tubulações de cobre; de Parvez (2018), que estudou as emissões liberadas no processo de fabricação de tubos de PVC para sistemas de água e esgoto, observando que esse tipo de tubulação possibilita a redução da pegada de carbono nos sistemas de distribuição de água devido à sua baixa energia incorporada, além de possuir custos de ciclo de vida mais baixos devido ao menor investimento de capital envolvido nos processos de instalação e operação; e de Asadi *et al.* (2016), que investigaram a pegada ambiental de sistemas em PEX e cobre para edifícios residenciais na América do Norte, indicando que a utilização dos tubos flexíveis pode diminuir quase a metade das emissões de dióxido de carbono liberado quando comparada ao emprego do cobre.

Portanto, tendo em vista que os setores da construção civil e de transporte são esferas da economia que exigem atenção quanto às suas condutas ambientais, que o PVC e o PEX são dois tipos de tubulações que podem ser empregadas na execução de sistemas prediais de água fria e que o meio acadêmico necessita que estudos ambientais que envolvam esses materiais, torna-se relevante avaliar a efetiva participação do transporte no comportamento ambiental das tubulações citadas, buscando identificar qual dos dois tipos de material é o mais recomendado para a execução de sistemas prediais de água fria, em diferentes localidades brasileiras. Partindo-se da prognose de que em locais de grandes faixas territoriais, desigualdades tecnológicas, industriais e de infraestrutura entre regiões, como o Brasil, o transporte pode corresponder a relevantes índices de poluição no ciclo de vida desses materiais.

1.1. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo principal a análise da influência do transporte necessário para realizar a logística de distribuição no ciclo de vida de tubulações de PVC e PEX utilizadas para executar sistemas prediais de água fria, buscando identificar qual o tipo de material apresenta o menor impacto ambiental em diferentes regiões do país.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Avaliar o ciclo de vida das tubulações estudadas, caracterizando as situações em que se tem a necessidade de transporte entre as etapas de fabricação e distribuição dos materiais;
- Simular os trajetos percorridos pelos materiais até chegar no local de utilização;
- Diagnosticar a participação do transporte nas emissões de CO₂ geradas pelo ciclo de vida das tubulações em diferentes regiões do país;
- Propor e identificar melhorias ambientais na logística de distribuição desses materiais, para incentivar o desenvolvimento sustentável da construção civil e no setor de transportes.

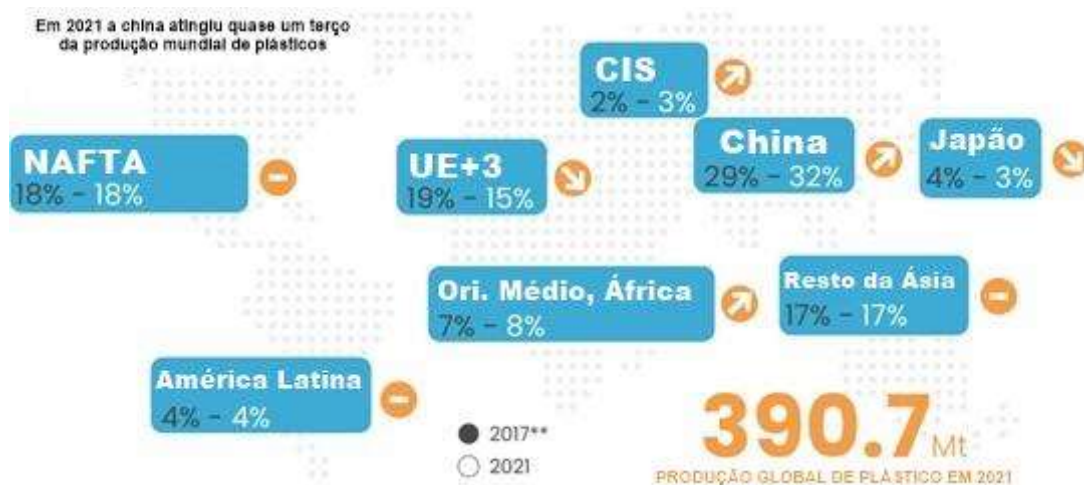
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O mercado das tubulações de plástico

Propriedades como durabilidade, leveza e maleabilidade tornaram os materiais plásticos essenciais para diversos ramos da indústria mundial e, dessa forma, indispensáveis no cotidiano da sociedade moderna (ISLAM, 2012). Tamanha popularidade e empregabilidade fez com que a produção mundial de termoplásticos atingisse a marca recorde de 390 milhões de toneladas no ano de 2021, conforme o anuário da *Plastics Europe* (2022).

A China e os países que compõem o Acordo de Livre-Comércio da América do Norte (NAFTA) são responsáveis pela metade da fabricação de plásticos no mundo, sendo estes os locais onde se encontram as maiores empresas desse ramo. Ainda, o Oriente Médio, com destaque para a Arábia Saudita e a Comunidade dos Estados Independentes (CIS) se mostram como territórios em ascensão no mercado dos transformados de plástico (PLASTICS EUROPE, 2021), conforme mostrado na Figura 1 e vem apresentando resultados satisfatórios para a economia interna.

Figura 1 – Panorama mundial da fabricação de plásticos.



Fonte: Plastics Europe adaptado (2021).

No ano de 2021, o setor brasileiro de plástico empregou mais de 330 mil trabalhadores, produzindo 7,1 milhões de toneladas de resinas, o que acarretou um faturamento de US\$24,09 bilhões (ABIPLAST, 2022). Dessa forma, essa nação sul-americana se consagra como um dos principais produtores desse material no sul ocidental e apresenta-se como um potencial exportador de resinas plásticas no mundo e, principalmente, no seu próprio continente.

A Associação Brasileira da Indústria do Plástico (2022) diagnosticou que de todos os transformados plásticos exportados pelo Brasil no ano de 2021, mais de 66% tinham como destino um país da América do Sul, sendo a Argentina, o Paraguai e o Chile as nações sul-americanas que mais adquiriram os produtos brasileiros. E, ainda, tais exportações totalizam um capital de mais de US\$1,3 bilhões para os cofres nacionais, o que equivale a um montante de aproximadamente 310 mil toneladas de plástico submetidas ao comércio exterior, tal qual exposto na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de exportação de transformados de plástico no Brasil.

Países	Quantidade em toneladas	% t	US mil	% US
Argentina	73784	23,8%	314370	24,0%
Estados Unidos	42049	13,6%	184647	14,1%
Paraguai	33101	10,7%	123447	9,4%
Chile	31553	10,2%	124873	9,5%
Uruguai	21995	7,1%	79915	6,1%
Colômbia	19988	6,5%	92058	7,0%
México	15250	4,9%	73066	5,6%
Bolívia	10536	3,4%	43867	3,3%

Espanha	9976	3,2%	18174	1,4%
Peru	7011	2,3%	36407	2,8%
Equador	3755	1,2%	20788	1,6%
Guatemala	3456	1,1%	10834	0,8%
Alemanha	2627	0,8%	14629	1,1%
República Dominicana	2293	0,7%	8175	0,6%
Costa Rica	2249	0,7%	9919	0,8%
Canadá	1821	0,6%	7454	0,6%
Outros	28042	9,1%	147972	11,3%
2021	309484	100%	1310595	100%

Fonte: ABIPLAST adaptado (2021).

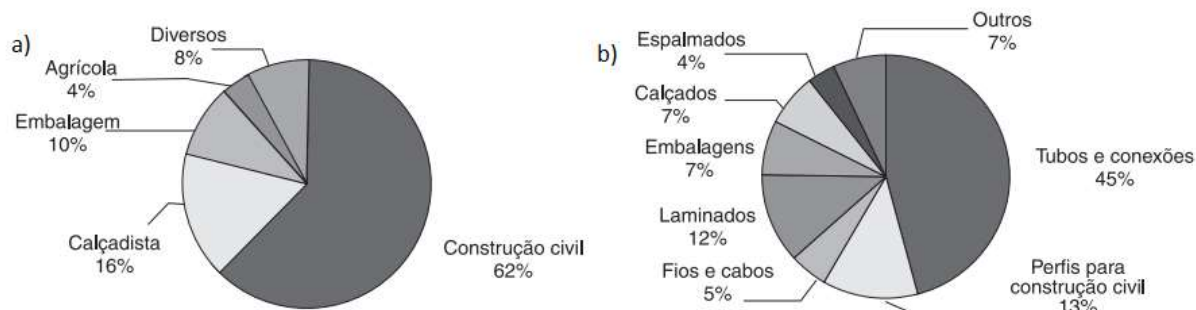
Uma das principais etapas para a efetivação do processo de exportação é o procedimento de transporte das mercadorias. Essa movimentação pode acontecer por diferentes modais de transporte, a depender de critérios como o tipo de carga, tempo de viagem e infraestrutura disponível (HUMMELS, 2007). Na América do Sul, conforme observado pela *Natural Resources and Infrastructure Division* (INECLAC, 2014), tem-se a predominância da utilização do transporte marítimo para as exportações intercontinentais, enquanto as movimentações intracontinentais são realizadas, em sua grande maioria, por meio de rodovias ou aviões.

Dentre os materiais plásticos fabricados no Brasil, as resinas de policloreto de vinila (PVC) e polietileno de alta densidade (PEAD), composição básica para a fabricação do PEX, estão entre os três tipos de produtos mais consumidos em 2021 (ABIPLAST, 2022), seja pela versatilidade ou seu custo-benefício.

2.2. Tubulações em policloreto de vinila (PVC)

Por se mostrar como um dos mais versáteis termoplásticos da indústria de polímeros (CANEVAROLO JR., 2002), os produtos de PVC desempenham um importante papel na qualidade de vida da sociedade moderna. Esse material pode ter suas características modificadas dentro de uma gama de opções, sendo suas propriedades alteradas para atender diferentes necessidades (RODOLFO JUNIOR *et al.*, 2006). Tal multifuncionalidade proporciona o emprego do PVC em diversos setores da economia, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – a) Principais aplicações do PVC no Brasil por setor da economia; b) Principais aplicações do PVC no Brasil por mercado.



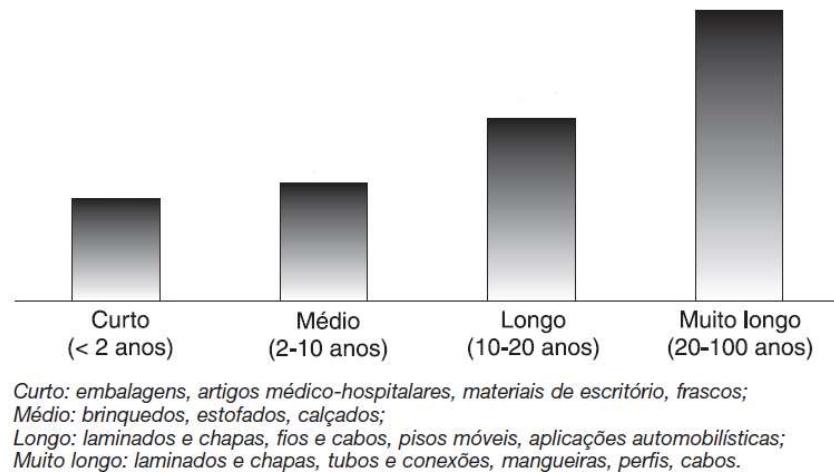
Fonte: Braskem (2021).

A construção civil é responsável por mais da metade da demanda de PVC no Brasil, sendo os tubos e conexões os principais itens utilizados do material (Figura 2.b). Essa realidade é explicada por Alvarenga *et al.* (2018) tendo em vista o custo-benefício do PVC quando comparado com outros produtos que desempenham as mesmas funções, como ferro galvanizado.

Tamanha popularidade nacional na utilização de tubos e conexões em PVC no desenvolvimento de sistemas prediais se dá devido às suas propriedades de resistência a ação de álcalis, ácidos, óleos e sais (BATISTA, 2017), ação antichama (GOUVEIA, 2010), alta trabalhabilidade e a não toxicidade da água potável (CORRÊA, 2011).

Ainda, outro fator que agrega na vantajosidade das tubulações é sua durabilidade, a NBR 15575-1 (ABNT, 2021) aponta que a vida útil de projeto (VUP) mínima para tubulações e junções de PVC é de 4 anos para instalações aparentes e facilmente substituíveis e 20 anos para sistemas prediais embutidas e enterradas, podendo essa duração ser ampliada em até 100 anos conforme o cuidado na utilização e a execução de manutenções periódicas (Figura 3) (ECVM, 2015).

Figura 3 – Estimativa da vida útil em serviço de produtos de PVC.

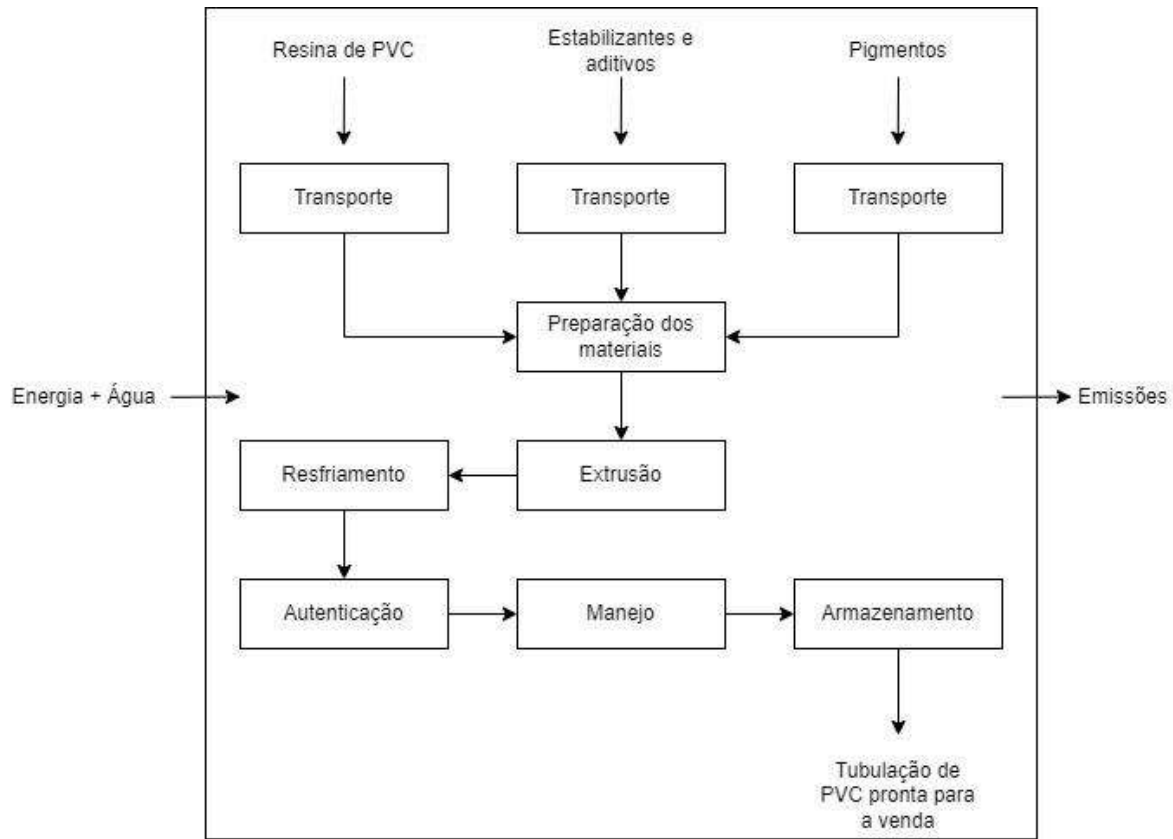


Fonte: ECVN (2015).

As matérias-primas do PVC são o cloro (Cl), advindo da eletrólise do cloreto de sódio (NaCl), e o eteno (C₂H₄), obtido por meio do craqueamento catalítico nas refinarias de petróleo (RODOLFO JUNIOR *et al.*, 2006). A proporção, em peso, de 57% de cloro e 43% de eteno resulta na resina de PVC, o composto em pó que serve de base para a fabricação de todos os produtos de PVC (IBPVC, 2022).

Para as tubulações e conexões, a resina de PVC é acrescida de aditivos plastificantes, estabilizantes a base de chumbo ou estanho, lubrificantes de parafina, pigmentação (IPU, 2000) e, por fim submetida ao processo de extrusão para a conformação das peças (EU, 2000). A Figura 4 mostra o fluxograma das etapas da fabricação de tubos de PVC, conforme definido pelo Instituto de Pesquisa de Química e Meio Ambiente de Viena (IKP, 1996) e atualizado por Alsadi *et al.* (2016).

Figura 4 – Diagrama esquemático da fase de produção de tubulação de PVC.



Fonte: IKP (1996) e ALSADI *et al.* (2016).

Observa-se que o transporte se faz presente em toda parte inicial da fabricação, sendo o responsável por reunir em um só local a resina de PVC, os estabilizantes, aditivos e pigmentos, para, então, proceder com as misturas e iniciar o processo de extrusão. Essa etapa configura na conformação do tubo, o qual, ainda mistura, é forçada a passar através de compressão por uma matriz quente que molda a seção transversal, portanto, é nesse momento em que se define o diâmetro interno e externo das tubulações (CARVALHO, 2019).

Após a extrusão tem-se o resfriamento do tubo e a sua autenticação, instante em que se é colocada a patente do fabricante e informações como diâmetro, lote e data de produção (CALLISTER, 2016). A etapa de manejo é a responsável pela alocação dos tubos recém-fabricados no local de armazenamento, acatando as respectivas recomendações das formas de alocação e proteção contra intempéries (ABPE, 2013). O ato da venda/revenda marca o início da próxima etapa do ciclo de vida da tubulação.

Em todas as etapas da Figura 3 tem-se o marco de uma ação e, conseqüentemente, a utilização de energia para a sua execução, resultando na liberação de emissões para a atmosfera,

sendo que, de acordo com Vahid *et al.* (2016), esses gases podem possuir substâncias tóxicas para a flora e a fauna.

Carvalho (2013) aponta que podem haver pequenas mudanças entre um fabricante e outro, principalmente na variação dos aditivos e estabilizantes utilizados na fabricação, porém o escopo da produção se mantém no padrão aqui apresentado.

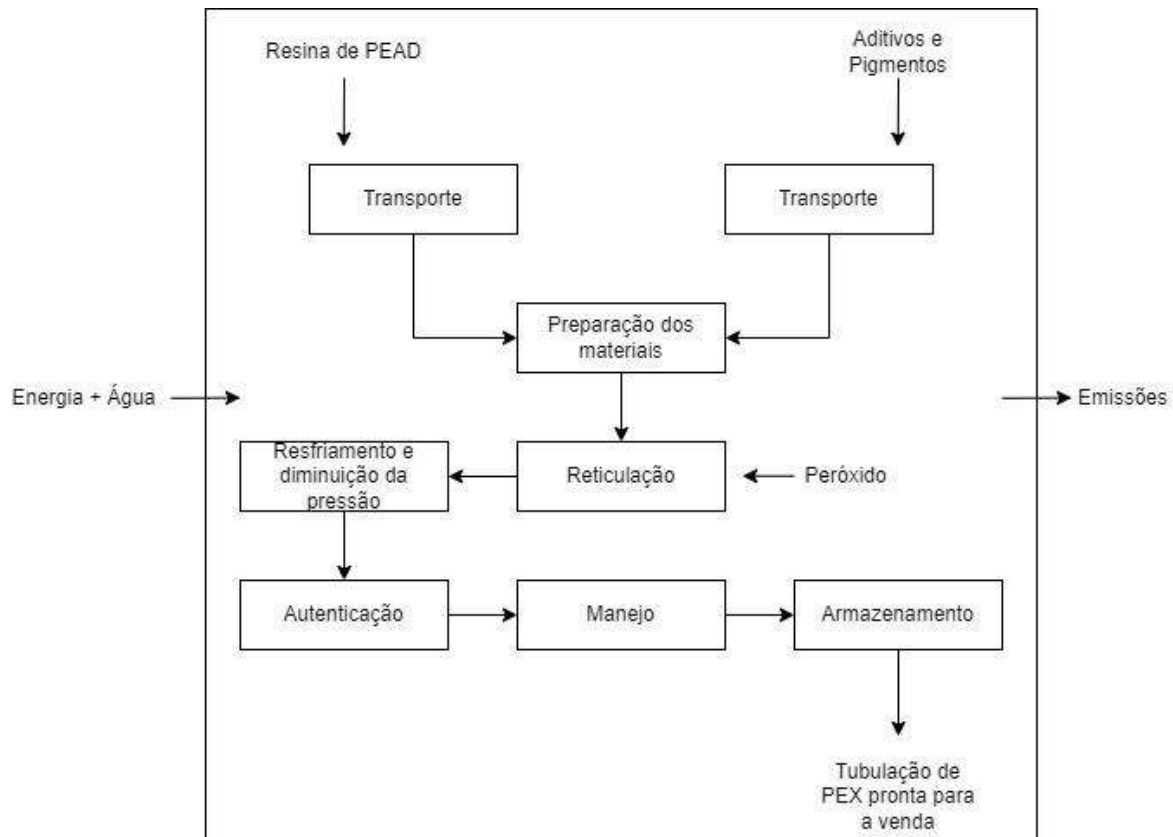
2.3. Tubulações em polietileno reticulado (PEX)

Também conhecido como um polímero termoplástico flexível, o polietileno (PE) é constituído por repetitivas cadeias de monômero de eteno (C_2H_4), substância que, submetida a um processo de polimerização, origina o material (MAIA JÚNIOR, 2012). Kelley *et al.* (2014) pontuam que é possível fabricar diferentes tipos de polietileno, principalmente no que diz respeito a sua densidade, sendo a maneira como a polimerização é realizada determinante para cada produto.

Todo produto de polietileno (PE) é resultado da combinação da destilação, dessalinização e hidrotratamento do petróleo com o gás natural (CALLISTER, 2016), processos que resultam na formação da resina de PE. O PEX é obtido da reticulação da resina de polietileno de alta densidade (PEAD), um mecanismo que retira os átomos de hidrogênio da composição original, forçando novas ligações químicas constituídas apenas de carbono, o que resulta em um material flexível e com alta resistência (COUTO, 2014). Já a resina PEAD é resultado do processamento de olefinas, hidrocarbonetos de cadeia aberta e dupla ligação de carbono (KELLEY *et al.* 2014).

De acordo com Frankling Associates (2011), a fabricação do PEX para sistemas prediais de água fria pode apresentar de três metodologias diferentes, sendo o método de Engel o mais disseminado na indústria mundial, que consiste no incremento de peróxidos para a reticulação da resina. A Figura 5 mostra o fluxograma das etapas do ciclo de vida de fabricação de tubos PEX seguindo o procedimento de Engel.

Figura 5 - Diagrama esquemático da fase de produção de tubulação de PEX pelo método de Engel.



Fonte: Frankling Associates (2011), Zhang *et al.* (2013) e Zhao e Mao (2013).

Bastante semelhante ao processo do PVC, o ciclo de fabricação do PEX se diferencia no processo de reticulação, em que se tem a adição de peróxido, responsável por reticular o polietileno durante a fabricação do tubo, enquanto a resina PEAD está em seu estado amorfo (FRANKLING ASSOCIATES, 2011). Consequente, aplicando alta temperatura e pressão à mistura de polietileno dentro de uma extrusora especial, tem-se a conformação dos tubos, seguindo os diâmetros e comprimentos pré-definidos (ZHAO e MAO, 2013).

O manejo e armazenamento do PEX deverá ser realizado de forma a evitar a exposição a raios ultravioletas e intempéries, tomando cuidado para não amassar as paredes do tubo e evitando a formação de vincos ao enrolar e desenrolar a tubulação (AMANCO, 2016).

Na construção civil esse material já é amplamente utilizado para a execução de redes de gás, contudo, para a implementação de sistemas hidráulicos tem-se, ainda, uma preferência pelos materiais convencionais, como o PVC, o PPR e o cobre (CURTINHAS *et al.*, 2018). Tal condição é explicada pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (2022) tendo em vista

o alto custo para a aquisição do PEX, a necessidade de ferramentas próprias para a instalação do material e a exigência de mão de obra especializada, escassa no Brasil para esse ramo.

As principais características do PEX para a execução de sistemas prediais hidráulicos estão relacionadas com a não necessidade de conexões, advinda da flexibilidade dos tubos para a realização de curvas (CONNELL *et al.*, 2014), a leveza, proporcionando mais trabalhabilidade na instalação (ENSLOW, 2008), durabilidade, estimada em mais de 50 anos (MUELLER; JAKOB, 2003), baixa rugosidade, minimizando pequenas perdas de carga (HAMOUDA *et al.*, 2001), alta resistência à corrosão e agentes químicos (KELLEY *et al.*, 2014) e suporte a elevadas temperaturas (FARIAS, 2017).

Ainda, de acordo com Curtinhas *et al.* (2018), a utilização do PEX contribui para uma obra mais limpa, organizada, rápida e com menor geração de resíduos, fatores que colaboram com as construções sustentáveis e dinamizam o processo de planejamento e gestão das construções.

2.4. ACV no contexto de sistemas prediais

O setor da construção civil oferece amplas oportunidades para aprimoramentos sustentáveis, começando pela cuidadosa seleção de materiais, racionalização do consumo de água e energia, adoção de melhores práticas construtivas, reutilização de materiais reciclados e resíduos, além da redução do consumo de recursos naturais (ROCHA, 2020). Com a crescente demanda por produtos mais sustentáveis, é essencial desenvolver metodologias que avaliem o impacto ambiental de edifícios e materiais de construção, visando atingir níveis superiores de desempenho ambiental no setor. Nesse contexto, a abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida desempenha um papel eficaz ao quantificar as questões ambientais associadas a produtos e processos na construção.

Apesar de ser uma ferramenta consolidada no contexto da construção civil, é notável uma certa defasagem de estudos que envolvem ACV na área de sistemas prediais. As análises encontradas, em sua grande maioria, abordam temas como o uso e reuso de água em edifícios (CLARCKE, 2009; MAESELE e ROUX, 2021; JEONG, 2018; GAMARRA, 2018), o comportamento ambiental de redes de água quente (COMODI *et al.*, 2014; SARABIA-ESCRIVA *et al.*, 2023; RALUY e DIAS, 2021) e sistemas de águas pluviais (MARINOSKI e GHISI, 2019; BYRNE *et al.*, 2022).

Dentre os estudos que mais se aproximam da temática de tubulações pode-se citar a pesquisa de Marson *et al.* (2021), que abordou os impactos ambientais na fabricação de tubos de PVC na Europa com diferentes tipos de ligas e juntas, identificando uma emissão de 2,52 kg CO₂ eq no processo produtivo de 1 kg de tubo de PVC, sendo a liga do tipo A a mais vantajosa tendo em vista o seu peso reduzido.

Tem-se também o trabalho de Xiong *et al.* (2020), que estudaram a conduta ambiental de tubulações em PVC e compararam-na com a de tubos de aço galvanizado e cobre para sistemas de abastecimento e drenagem em edifícios da China, diagnosticando que as redes executadas em PVC apresentam 86% de redução do consumo de energia, quando comparado com tubos de aço galvanizado, e 91%, em relação às tubulações de cobre. Ainda, os autores pontuaram que os tubos de aço galvanizado e cobre apresentam uma margem de poluição superior à do PVC de até 11,3 vezes em um único indicador para avaliação da abrangente de impacto ambiental local.

Outro autor que também teve tubulações prediais como foco de seus estudos é Parvez (2018), que analisou as emissões liberadas no processo de fabricação de tubos de PVC para sistemas de água e esgoto, observando que que essa tipo de tubulação permite reduzir a pegada de carbono de sistemas de distribuição de água devido à baixa energia incorporada e energia de bombeamento necessária, além de que possui os custos de ciclo de vida mais baixos devido ao menor capital envolvido nos processos de instalação e operação.

Por fim, Asadi *et al.* (2016) investigaram a pegada ambiental de sistemas em PEX e cobre para edifícios residenciais na América do Norte. Seus resultados indicaram que o uso de tubulação PEX em vez dos sistemas tradicionais de tubulação de cobre em edifícios residenciais reduziria o custo total do edifício em até 63% ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, essa substituição diminui até 42% das emissões de dióxido de carbono e diminuir o efeito negativo dos impactos ambientais na terra, na água e no ar.

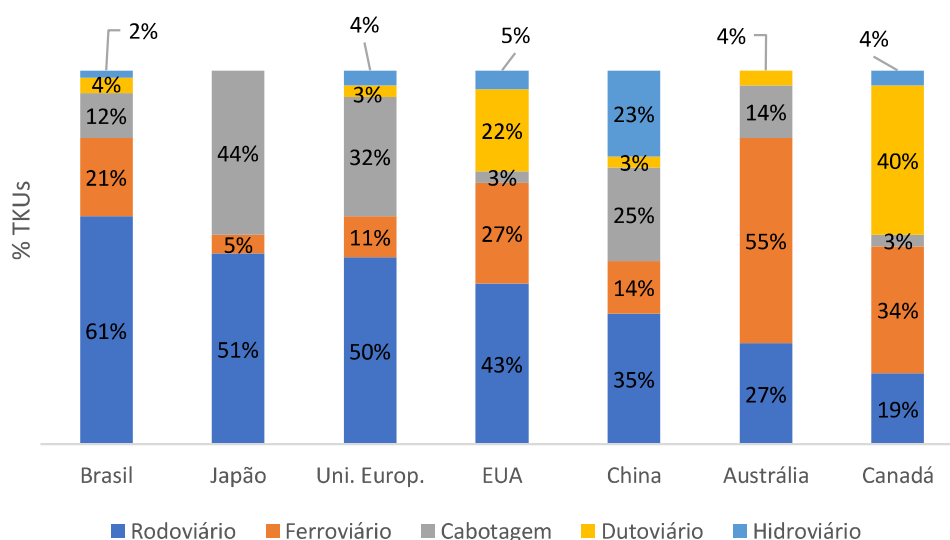
2.5. Sistema de transporte brasileiro e sua relação com o meio ambiente

O setor dos transportes está plenamente ligado ao desenvolvimento das nações, garantindo o acesso e circulação entre pessoas e mercadorias, o que confirma o grau da sua importância na economia, permitindo o progresso nas variadas áreas do país. A competitividade

entre países é impulsionada na medida em que sua infraestrutura de transportes atende às necessidades e demandas de seu escoamento produtivo (RUIZ-PADILLO *et al.*, 2020).

Assim como outros países da América Latina, o Brasil possui uma certa desconexão entre suas modalidades de transporte, sendo altamente dependente de apenas um modal, o rodoviário (CNT, 2022). Mais de 60% das mercadorias do país são movimentadas por rodovias, conforme mostrado na Figura 6, configurando uma realidade distante da necessidade de redução de custos com fretes, que pode chegar à metade em outros países com dimensões semelhantes às do Brasil e com uma intermodalidade eficiente.

Figura 6 – Sistema de transporte brasileiro comparado com outras regiões.

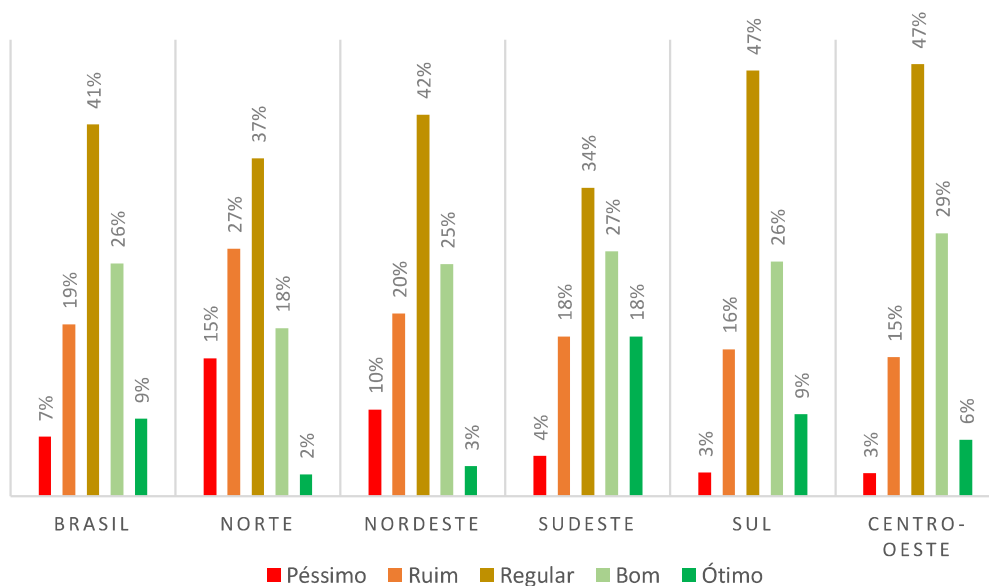


Fonte: Adaptado de Alvarenga (2020).

Quando comparada a matriz de transportes brasileira com a de outros países é perceptível o quão desequilibrada é a utilização dos diferentes modais para transporte de cargas no Brasil. Considerando o modal ferroviário, por exemplo: os Estados Unidos movimentam 27% das suas cargas por meio desta modalidade, enquanto a Austrália movimenta 55% e o Canadá 34%. Bastante disseminado na China, o transporte aquaviário (hidroviário e cabotagem) representa 48% do TKU (toneladas por quilômetro útil) transportados no país, número semelhante ao do Japão e da União Europeia. Os dutos são bastante utilizados no Canadá (40%) e nos Estados Unidos (22%). O único modal em que o Brasil se destaca no transporte de cargas é, de fato, o modal rodoviário, em que o país atinge índices muito superiores às outras nações (ALVARENGA, 2020).

O fato do transporte rodoviário ser o mais utilizado no país não significa que ele esteja em boas condições. A Pesquisa CNT de rodovias, desenvolvida pela Confederação Nacional do Transporte e o SEST SENAT (2022), apurou que as condições da malha rodoviária brasileira pioraram nos últimos anos, sendo que 66% das rodovias são consideradas como regulares, ruins ou péssimas, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Avaliação da qualidade das rodovias brasileiras.



Fonte: Adaptado de CNT e SEST SENAT (2022).

As regiões norte e nordeste são as que possuem a maior quantidade de rodovias em condições péssimas ou ruins, essa realidade afirma que a maioria das vias dessas localidades apresentam problemas graves em seu pavimento, sinalização ou geometria. Ainda é possível observar a desproporcionalidade entre as regiões com rodovias em bons estados, principalmente no sudeste, localidade com o maior número de estradas privatizadas e com quase a metade das vias classificadas como ótimas ou boas, situação distante do contexto do restante do país.

A baixa qualidade das rodovias, além de apresentar riscos para a segurança dos seus usuários, gera prejuízos econômicos e ambientais advindos da necessidade de maior consumo de energia pelos veículos (CNT, 2022).

As deficiências na superfície do pavimento das rodovias, tais como rugosidades, buracos, trincas e curvas acentuadas ou em excesso, aumentam consideravelmente a emissão de gases poluentes. Essas deficiências causam desgastes excessivos de peças mecânicas, deterioração do sistema de suspensão e pneus, alto nível de ruído e congestionamentos que

comprometem a saúde do condutor. Com o maior consumo de combustível, elevam-se as emissões. Um estudo de Unal *et al.* (2004) verificou que trechos de rodovia com frequência constante de frenagens devido a buracos, trincas e outras inadequações possuem maior concentração de poluição do que vias de boa qualidade. Ainda, Pádua (2014) diagnosticou que veículos trafegando por rotas de má qualidade apresentam emissões, aproximadamente, 11% superiores às estimadas para as rotas de boa qualidade.

Por fim, vale destacar que o setor de transporte no ano de 2019 representou 45,3% das emissões totais de CO₂ no Brasil, sendo o modal rodoviário responsável por 92% das emissões (EPE, 2020), enfatizando que países onde se tem esse tipo de transporte como o predominante estão desfavoráveis com o desenvolvimento sustentável, colaborando com a geração de emissões nocivas ao meio ambiente.

2.6. Influências do transporte em ACVs de materiais da construção civil

Segundo Godinho *et al.* (2015) o transporte se faz presente nas três fases da vida de um empreendimento: fase de desconstrução – movimentações de carga de resíduos provenientes de demolições; fase operacional – distâncias curtas para o transporte de materiais e insumos para manutenções e reformas; e fase inicial – se estende desde a extração da matéria prima até a construção da edificação, sendo essa a maior movimentação de material.

De acordo com Caldas e Sposto (2017), diversos estudos de ACV costumam desprezar a fase de transporte no ciclo de vida dos materiais, tendo em vista que quando essa etapa é relacionada com o escopo total do produto apresenta resultados pouco expressivos. Entretanto, esses mesmos autores pontuam que o Brasil é um país de dimensões continentais e desigualdades tecnológicas entre suas regiões, o que gera um desequilíbrio na oferta de materiais para cada localidade. Portanto, é importante refletir sobre qual a participação do transporte de cargas nas emissões de GEE brasileiras, tendo em vista as extensas faixas territoriais e o grau de desenvolvimento tecnológico extremamente variável entre um local e outro.

A literatura apresenta uma variada margem do percentual do transporte em relação às emissões poluentes totais liberados no ciclo de vida de materiais da construção civil. A Tabela 2 mostra a participação do transporte em relação às emissões gerais de diferentes pesquisas que envolvem materiais de construção civil.

Tabela 2 - Percentual do transporte em relação às emissões totais.

Autores	Escopo da ACV	Local do estudo	Percentual do transporte nas emissões de CO₂
Taborianski e Prado (2012)	Fachadas de edifícios de escritórios	São Paulo, Brasil	7,1% a 14,8%
Nabut Neto (2011)	Vedação de fachadas em Light Steel Frame	Entorno do Distrito Federal, Brasil	2,9% a 4%
Palácio (2013)	Vedação de habitações populares em Light Steel Frame	Entorno do Distrito Federal, Brasil.	13,4% a 15%
Gong <i>et al.</i> (2012)	Edifícios residenciais	Pequim, China	8% a 11%
Caldas e Sposto (2017)	Blocos estruturais de concreto	Região norte, Brasil	30% a 70%

Fonte: A autoria própria (2023).

É perceptível uma grande variação entre uma análise e outra, o que pode ser explicado pelo escopo de estudo de cada pesquisa, que envolve um determinado material e um local geográfico, quesitos que influenciam na ACV.

2.7. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

De acordo com Coltro (2007) a avaliação do ciclo de vida é um artifício que proporciona o estudo do impacto ambiental vinculado a fabricação e/ou utilização de um produto, permitindo levantar oportunidades para aperfeiçoar os aspectos sustentáveis na cadeia de produção do material. Dessa forma, uma ACV engloba todas as circunstâncias que envolvem a vida de um artefato, ou seja, analisa os procedimentos que compreendem desde a aquisição da matéria-prima até a disposição final, passando pelas etapas de fabricação, distribuição, uso, reciclagem e destino dos resíduos finais (ABNT, 2014).

Ramírez (2009) aponta que a ACV apresenta uma visão global de determinado sistema de produto e funciona como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão na escolha de materiais que desempenham funções similares a partir de seus requisitos ambientais. E, ainda, ajuda na identificação de oportunidades de melhoria no comportamento ambiental de produtos, visto que determina os impactos ao meio ambiente associados ao ciclo de vida de um aparato ou processo (TAVARES, 2006).

ACV proporciona uma perspectiva geral das consequências ambientais decorrentes de um produto ao longo do seu ciclo de vida, onde são avaliados os descartes produzidos nos diferentes processos, tais como as emissões atmosféricas e a geração de resíduos sólidos, o consumo de recursos materiais e energia e as consequências ambientais do uso e disposição final do produto. Com caráter gerencial, a metodologia vem sendo consolidada como ferramenta quantitativa de impactos ambientais (PÉREZ *et al.*, 2020).

2.7.1. Origem da ACV

Essa ferramenta começou a ser utilizada na década de 1960, quando os Estados Unidos enfrentavam uma potente crise petrolífera, o que obrigou as grandes empresas a repensarem o modo de exploração dos recursos naturais (SFEIR, 2013). Nesse período, diversos estudos foram desenvolvidos com enfoque nas questões energéticas e nos aspectos ambientais, incluindo estimativas de emissões sólidas, gasosas ou líquidas (CHEHEBE, 2002). Uma das primeiras publicações que marcou o uso da metodologia de ACV em sistemas de produção foi o trabalho de Harold Smith, em 1963, na *World Energy Conference*, o autor apresentou o cálculo das necessidades de energia para a fabricação de produtos químicos (EPA, 2006).

No ano de 1965, uma multinacional do ramo de bebidas custeou um estudo realizado pelo *Midwest Research Institute* (MRI) para comparar diferentes tipos de embalagens com a intenção de diagnosticar qual era a que tinha a menor demanda de recursos naturais e as mais baixas liberações de partículas poluidoras em seu processo de fabricação. Em 1970, empresas nos Estados Unidos e na Europa realizaram estudos semelhantes abordando discussões sobre materiais para embalagens (CAMPOLINA, 2015). As bases de dados disponíveis para a realização das análises eram restritas, em sua grande parte englobavam apenas documentos de governo e relatórios técnicos (EPA, 2006). O processo de quantificar os índices de emissões tornou-se conhecido como Análise de Recursos e Perfil Ambiental (ARPA), em inglês *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA).

A pedido da *Environmental Protection Agency* (EPA), em 1974, o MRI realizou um aprimoramento dos estudos das embalagens. O resultado desse trabalho ficou conhecido como um marco no surgimento da ACV. Fruto deste, em 1985, a Comunidade Econômica Europeia lançou a primeira normativa para embalagens na área de alimentos, criando a obrigatoriedade

do acompanhamento da geração de resíduos e do consumo de matérias-primas, energias (CHEHEBE, 2002).

O termo “Avaliação do Ciclo de Vida” foi proposto pelos participantes de um workshop da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) no ano de 1990. Em 1997, foi lançada pela Organização Internacional para Padronização (ISO) a norma ISO 14040, Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Em 2002, o *United Nations Environmental Programme (UNEP)*, juntamente com a SETAC, criou uma parceria internacional com empresas, governos e organizações acadêmicas e civis para estimular o pensamento do ciclo de vida, conhecida como *Life Cycle Initiative*. Esse programa teve por função facilitar o acesso ao conhecimento do ciclo de vida ambiental, econômico e social.

No Brasil, a ACV teve início na metade da década de 1990, quando um subcomitê específico para o tema foi implantado no Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GAN) em 1994 (FGV, 2017). No ano de 2001 foi lançada a versão internacional traduzida da norma ISO, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e de lá para cá veio sendo atualizada conforme a realidade brasileira. A Associação Brasileira de Ciclo de Vida foi criada em 2002, composta por pessoas físicas e jurídicas interessadas no desenvolvimento e aplicação da ACV no Brasil. Atualmente a ABCV promove eventos, dissemina os conceitos da avaliação do ciclo de vida e colabora com a formação de cientista nessa área do conhecimento. O Quadro 1 reúne os principais marcos no avanço da ACV em território brasileiro.

Quadro 1 – Principais marcos da ACV no Brasil.

Ano	Ocorrência	Referencial
1994	Foi criado o Grupo de Apoio a Normalização GANA na ABNT para a colaboração do Brasil no Comitê Técnico (TC207) da ISO.	SILVA, KULAY (2006)
1997 a 2000	O Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) do Instituto Técnico de Alimentação, em parceria com associações e empresas e com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) desenvolveu o projeto “Análise de Ciclo de Vida de Embalagens para o Mercado Brasileiro” que realizou diversos estudos de ACV para sistemas de embalagem.	CETEA (2014)
1998	Foi publicado o livro “Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000”, de José Ribamar Chehebe, que explica e comenta as normas da série ISO relativas à ACV. O autor baseou nos trabalhos do Comitê Técnico TC207.	CHEHEBE (2002)

1998	Foi criado o grupo de prevenção da poluição (GP2) pelo departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP com o objetivo de contribuir para a consolidação do uso da ACV no Brasil através de trabalhos como dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos publicados em periódicos e congressos nacionais e internacionais para prevenção da poluição utilizando a ferramenta.	SILVA, KULAY (2006)
1999	Criação do Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (CB 38) da ABNT. O CB 38 tem no SC 05 o grupo responsável pelas normas sobre ACV no Brasil.	SILVA, KULAY (2006)
2001	O país teve a primeira norma da série ISO 14040 traduzida pela ABNT despertando o interesse de empresas e associações brasileiras sobre ACV para avaliação de processos produtivos com ênfase ambiental.	ABNT (2014)
2002	Foi fundada a Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV) para a divulgação do uso da ferramenta no Brasil.	SILVA, KULAY (2006)
2004	A ABNT publicou as normas traduzidas NBR ISO 14041 e NBR ISO 14042.	ABNT (2014)
2005	A ABNT publicou a norma traduzida NBR ISO 14043.	ABNT (2014)
2007	Foi publicado o livro “Ciclo de vida de Embalagens para Bebidas no Brasil” de Renata Bachmann Guimarães Valt onde a autora apresenta a ACV de três embalagens para bebidas no Brasil, o alumínio, o PET e o vidro considerando as taxas	VALT (2007)
2007	Foi realizado a “Conferência Internacional de Avaliação do Ciclo de Vida – CILCA 2007” com o objetivo de realizar trocas de experiências e conhecimentos, além de consolidar o conceito e gerenciamento de ciclo de vida na América Latina, integrando essa região com outras onde a ferramenta está mais avançada.	ABCV (2014)
2008	Foi realizado o primeiro “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida – I CBGCB” em Curitiba/PR, onde foram ministrados cursos relacionados às ferramentas computacionais de apoio a ACV, palestras e apresentação de trabalhos sobre o tema, aplicação da gestão do ciclo de vida nos setores de energia, transporte e construção, com o intuito de realizar a integração de conceitos e métodos sobre ACV.	ABCV (2014)
2009	ABNT publicou as novas edições das normas ISO 14040 e ISO 14044.	ABNT (2014)
2010	A segunda versão da edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realizada em 2010 na cidade de Florianópolis SC.	ABCV (2023)

2012	A terceira edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realizada na cidade de Maringá PR.	ABCV (2023)
2014	ABNT publicou as novas edições das normas ISO 14040 e ISSO 14044.	ABNT (2014)
2014	A quarta edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realiza em novembro de 2014 na cidade de São Bernardo do Campo SP.	ABCV (2023)
2016	A quinta edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realiza na cidade de Fortaleza/CE	ABCV (2023)
2018	A sexta edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realiza na cidade de Brasília.	ABCV (2023)
2019	Lançamento do livro “Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro” que apresenta metodologias de elaboração de ACV para o país.	UGAYA <i>et al.</i> (2019)
2021	A sétima edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” foi realizada de forma remota.	ABCV (2023)
2021	Lançamento da pedra fundamental da Rede ACV, entidade que terá como objetivo a melhoraria da quantidade e qualidade dos inventários de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que melhor representam as realidades do Brasil.	ABCV (2023)
2023	A oitava edição do “Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida” será realizada na cidade de São Paulo/SP e terá como tema a “ACV na transição para uma economia circular e de baixo carbono”.	ABCV (2023)

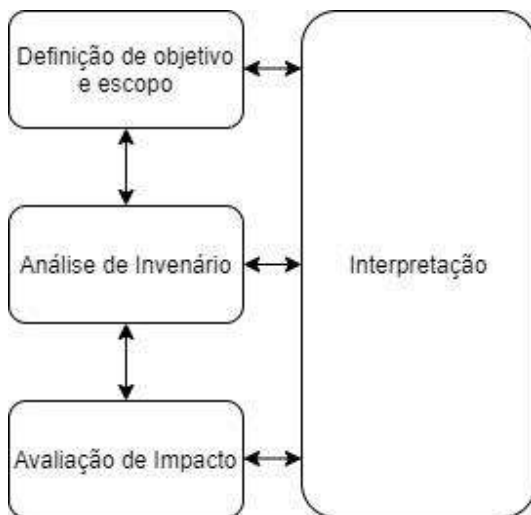
Fonte: Adaptado de Campolina (2015) e ABVC (2023).

2.7.2. Metodologia da ACV

Segundo Piekarski (2015) houve a necessidade da padronização na forma de realizar uma ACV, visto que estudos de produtos iguais resultavam em impactos diferentes, devido a definição de parâmetros diversificados. Dessa forma, atualmente, a elaboração de ACV é regida pelas normas ABNT NBR ISO 14044/2014a: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações e ABNT NBR ISO 14040/2014b: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura, que estabelecem os parâmetros para o desenvolvimento dos estudos ambientais relacionados ao produto.

Uma ACV é composta por quatro fases, conforme estabelecido pela NBR ISO 14044 (ABNT, 2014), sendo elas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida.



Fonte: ABNT (2014).

De acordo com Lobo (2010), ao estruturar a ACV em fases, tem-se a possibilidade de que cada etapa se retroalimente, relacionando-as entre si, o que favorece o controle do processo e facilita a compreensão de todo o ciclo de vida do material em estudo.

2.7.3. Definição de objetivo e escopo

O objetivo e escopo de uma ACV está relacionado com a definição clara da aplicação pretendida e as razões que envolvem a realização do estudo (ABNT, 2014). Para tal deve-se analisar, segundo Chehebe (2002), a viabilidade geográfica, técnica e histórica da avaliação, portanto cabe nesta etapa determinar a unidade funcional do estudo em questão, até onde ele abordará (fronteiras do sistema), as bases de dados em que serão extraídas as informações e o *software* para a modelagem da ACV.

2.7.4. Unidade funcional

A unidade funcional da ACV é definida por Mourad *et al.* (2007) como o sendo o desempenho quantitativo de um sistema de produto e tem como objetivo primário servir de

unidade de referência do estudo. Dessa forma, todos os dados do estudo de ACV são relacionados à unidade funcional, ou seja, todas as entradas e saídas do sistema são vinculadas a essa unidade e, por esse motivo, precisa ser bem definida.

Estipular a unidade funcional da análise a ser desenvolvida mensura e parametriza as emissões com a quantidade de produto fabricada, dando embasamento de proporcionalidade direta entre as entradas e saídas da ACV (VALT, 2007).

Para ACVs voltadas aos materiais da construção civil a unidade funcional recomendada pela norma britânica EN 15804 (BRE, 2012) deve estar baseada no uso relevante quantificado ou no desempenho característico do produto quando aplicado à construção e na vida útil de serviço do produto, ou na vida útil da edificação, por relacionar o desempenho funcional do produto ao longo de um período relevante, ou seja, a unidade funcional deve ser definida de tal forma a ser compatível com a unidade utilizada em projetos ou equivalente aquela em que o material é vendido. Por exemplo, o estudo de Nabut Neto identificou os impactos ambientais para a execução de 1 m² de vedação de fachadas com *steel frame* enquanto Marson *et al.* (2021) avaliaram o comportamento ambiental de 1 kg de tubulação em PVC.

2.7.5. Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema funcionam como fator limitante da ACV, definindo em até onde vai a investigação (ABNT, 2014), isto é, estipulam e moldam quais aspectos do ciclo de vida serão contemplados no estudo e quais não serão. Dessa forma, tem-se como as fronteiras mais utilizadas: do berço ao túmulo, englobando desde o início da extração das matérias primas até a disposição final do produto (KOTAJI *et al.*, 2003); do berço ao portão de fábrica, abrangendo os procedimentos de extração dos insumos e finalizando no processo de fabricação (SAIC, 2006); do portão de fábrica ao túmulo, englobando as etapas de pós fabricação, como distribuição e uso, até o descarte do material (JIMÉNEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2000); e do portão ao portão de fábrica, envolvendo apenas as técnicas de confecção, distribuição e uso (SILVA; KULAY, 2006).

Apesar de existirem fronteiras já pré-estabelecidas, nada impede de uma ACV englobar esferas diferentes das apresentadas.

2.7.6. Softwares e Base de Dados

Chehebe (2002) aponta que o desenvolvimento de uma ACV pode ser uma tarefa complexa, que exige uma alta capacidade de detalhamento para a realização do levantamento dos dados de fluxo de matéria e consumo de energia envolvidos no processamento e utilização do um produto, dessa forma requer um grande volume de informações e cálculos para determinar a relação do ciclo de vida com os impactos ambientais.

Buscando diminuir as dificuldades na elaboração de ACVs o mercado conta com uma diversidade de *softwares* que facilitam os cálculos e reúnem todas as informações envolvidas em cada etapa do ciclo de vida, servindo como uma interface de modelagem para variados produtos (MARGUGLIA *et al.*, 2013). Cada programa computacional de ACV possui suas próprias particularidades e interfaces, sendo que a maior parte deles necessita de pagamento para utilização. A Tabela 3 reúne alguns dos softwares mais utilizados no mundo, sendo estes os mais disseminados entre pesquisadores e empresas, de acordo com Jönbrink *et al.* (2000), USEPA (2014) e Curran (2006).

Tabela 3 - Softwares mais utilizados para elaboração de ACVs.

Softwares	País de Origem
GaBi	Alemanha
LCAiT	Suécia
GREET	Estados Unidos
IDEMAT	Holanda
KCL - ECO	Finlândia
LCAPIX	Estados Unidos
Regis	Suíça
SimaPRO	Holanda
SPOLD Data Exchang	Dinamarca
Umberto	Alemanha
OpenLCA	Alemanha
Gemis	Alemanha
BEES	Estados Unidos
TEAM	França
Environmental Impact Estimator	Canadá
AIST-LCA	Japão
Boustead Model	Reino Unido
ECO-it	Holanda

Fonte: Jönbrink *et al.* (2000), USEPA (2014) e Curran (2006).

Dentre os programas citados o *GaBi* é o mais disseminado no mundo, seja pela sua interface simples, facilitando o manuseio de informações, ou pelo seu rico acervo de dados próprios, permitindo um resultado mais próximo da realidade. A utilização do *GaBi* é paga, assim como a maioria destes programas.

Outro *software*, agora de utilização gratuita, de grande vinculação mundial é o *OpenLCA*. Apesar de ser um software livre, as bases de dados devem ser incorporadas ao programa, ou seja, compradas com os seus próprios fornecedores. Contudo, a empresa Green Delta, desenvolvedora do *OpenLCA*, disponibiliza para estudantes pesquisadores algumas bases de dados de forma gratuita, perante cadastro e por tempo determinado (CURRAN, 2006).

As bases de dados podem vir inseridas nos próprios *softwares* ou compradas separadamente e importadas para os programas. De acordo com Levasseur *et al.* (2016) as buscas pelos arquivos de informações devem priorizar o objeto da ACV, visto que os bancos de dados podem apresentar vertentes direcionadas para ramos específicos ou serem destinadas à utilização somente em certas localidades. A Tabela 4 apresenta as principais bases de dados que permitem o desenvolvimento de ACVs.

Tabela 4 - Maiores bases de dados para desenvolvimento de ACV e suas vertentes.

Bases de dados	Principal Vertente
Australian LCI Data Project	Produtos e serviços da indústria australiana.
BUWAL 250	Produção de embalagens.
Canadian Raw Materials Database	Materiais de commodities canadenses.
Ecoinvent	Avaliações ambientais de produtos e processos em todo o mundo.
EDIP	Análises ambientais durante o desenvolvimento de produtos industriais.
Franklin USLCI	Metais e semimetais, vidro e cerâmica, papel e cartolinas.
IVAM LCA Data	Portadores de energia e tecnologias, produção de materiais e serviços de transporte.
Japan National LCA Project	Atividades de produção industrial japonesas.
LCA Food	Setor agroalimentar.
SPINE@CPM	Produtos e atividades empresariais.
GaBi	Avaliações ambientais de produtos e processos em todo o mundo.

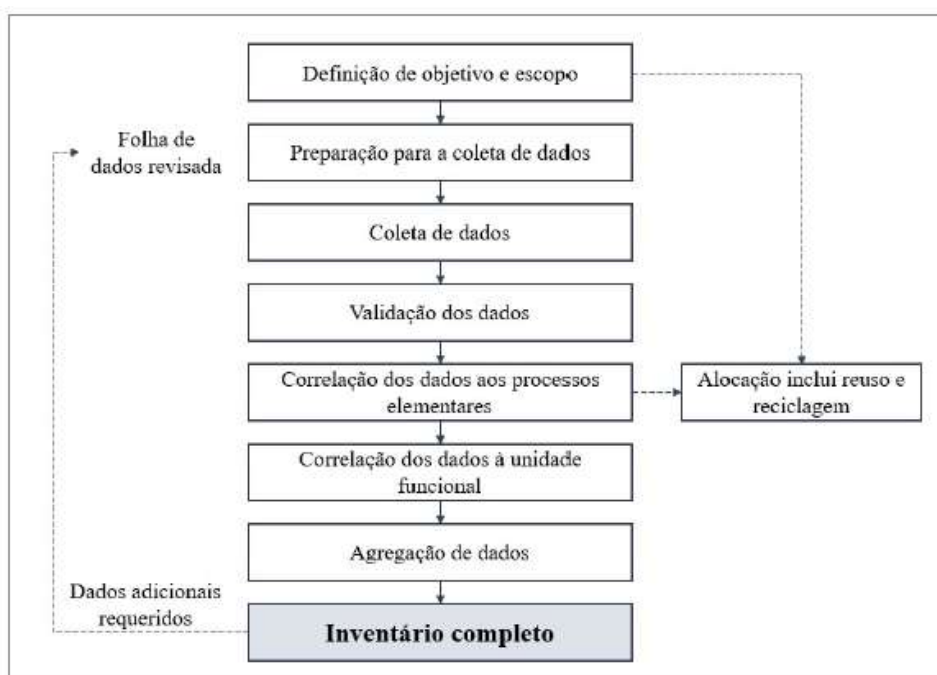
Fonte: Jönbrink *et al.* (2000), USEPA (2014) e Curran (2006).

Para ACV de materiais para construção civil tem-se uma predominância, de acordo com Kalakul *et al.* (2014), das bases de dados *Ecoinvent*, *GaBi* e *Japan National LCA Project*, visto que elas são compostas por um acervo consistente de informações que envolvem essa temática.

2.7.7. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Com o objetivo e o escopo definidos parte-se para a etapa de análise de inventário do ciclo de vida. Neste momento é realizado a coleta de dados, quantificação e relacionamento entre as variáveis que constituem o ciclo de vida do material, da atividade ou do processo em estudo (ABNT, 2014). O ICV, de acordo com Chehebe (2002), é a técnica de quantificar as matérias-primas, emissões atmosféricas, gastos de energia, geração de resíduos sólidos e qualquer outra liberação proveniente do ciclo de vida. A Figura 9 apresenta o fluxograma indicado pela NBR ISO 14044 (ABNT, 2014) para o desenvolvimento de um inventário do ciclo de vida.

Figura 9 - Procedimento para a elaboração do ICV.



Fonte: ABNT (2014).

Chehebe (2002) ainda aponta que a coleta dos dados que compõem o ciclo de vida é oriunda do acompanhamento da cadeia de produção, distribuição e utilização do material, de acordo com as limitações das fronteiras. Esse monitoramento pode ser feito tomando como base

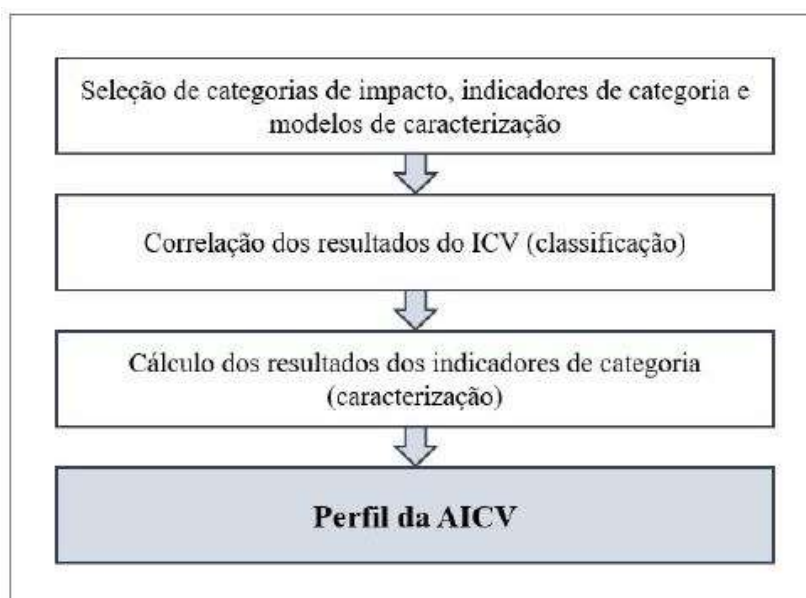
uma fábrica e distribuidora existente e inserida no espaço em análise ou por meio de estimativas baseadas em literatura tarimbada. Ainda, é importante registrar a data da coleta e todas as informações adicionais julgadas importantes para o desenvolvimento da ACV.

A qualidade e a confiabilidade da avaliação de ciclo de vida são totalmente dependentes da credibilidade das informações levantadas, principalmente nos dados qualitativos. Portanto, Lobo (2010) recomenda que sejam realizados procedimentos de checagem, comparando o produto da ACV com outros estudos que englobam os mesmos materiais, a fim de verificar se o resultado obtido está de acordo com a realidade.

2.7.8. Avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV)

A AICV é a parte mais importante do estudo, visto que é o momento em que se transforma os resultados do ICV em informações quantitativas a respeito dos impactos associados ao sistema de estudo (ABNT, 2014). A Figura 10 mostra os elementos mandatórios dessa etapa da ACV.

Figura 10 - Elementos da AICV.



Fonte: ABNT adaptado (2014).

A NBR ISO 14044 (ABNT, 2014) recomenda, para o desenvolvimento da AICV, que se utilizem métodos e categorias de impacto amplamente disseminados pela academia científica e com uma notória credibilidade entre os pesquisadores da área. Nos dias atuais existem uma

enorme gama de métodos de avaliação, sendo sua escolha baseada de acordo com o escopo e o objetivo definidos previamente (ZANGHELINI *et al.*, 2017) observando, principalmente, as categorias de impacto contempladas.

As categorias de impacto, de acordo com Marguglia *et al.* (2013), são entidades que representam os problemas ambientais relevantes associados aos resultados da análise do ICV e são definidas com base nas questões ambientais relacionadas ao sistema de produto, levadas em consideração no objetivo e escopo da ACV. O Quadro 2 apresenta as principais categorias de impacto utilizadas na AICV consideradas pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, apresentando a escala de impacto, os fatores que contribuem com a degradação, a metodologia de cálculo para identificar a quantidade do agente agressivo ao meio ambiente e os efeitos causados por ele (EPA, 2006).

Quadro 2 - Categorias de impacto e suas características.

Categoria de impacto	Escala	Fatores que contribuem no impacto	Método de cálculo	Efeitos
Aquecimento global	Global	Dióxido de carbono (CO ₂) Dióxido de nitrogênio (NO ₂) Metano (CH ₄) Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbono (HCFCs) Brometo de metila (CH ₃ Br)	Converte os dados do inventário em dióxido de carbono (CO ₂) equivalente.	Degelo polar, a perda da umidade do solo, estações mais longas, perda ou mudança de florestas e mudanças dos padrões de vento e mar.
Depleção da camada de ozônio	Global	Clorofluorcarbonos (CFCs) Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) Halons Brometo de metila (CH ₃ Br)	Converte os dados do inventário em triclorofluormetano (CFC-11) equivalentes.	Aumento da radiação ultravioleta
Potencial de Acidificação	Local e regional	Óxidos de enxofre (SO _x) Óxidos de nitrogênio (NO _x) Ácido clorídrico (HCL) Ácido Fluorídrico (HF) Amoníaco (NH ₄)	Converte os dados do inventário em íons hidrogênio (H ⁺) equivalentes.	Corrosão, acidificação de corpos d'água, efeitos na vegetação e efeitos no solo.

Eutrofização	Local	Fosfato (PO ₄) Óxido de nitrogênio (NO) Dióxido de nitrogênio (NO ₂) Nitratos Amônia (NH ₄)	Converte os dados do inventário em fosfato (PO ₄) equivalentes.	Aumento de nutrientes em corpos d'água (fosforo e nitrogênio), tais como lagos e estuários e fluxos lentos, causando crescimento excessivo das plantas e esgotamento de oxigênio.
Formação de oxidantes fotoquímicos	Local	Hidrocarbonetos não-metano (NMHC)	Converte os dados do inventário em etano (C ₂ H ₆) equivalentes.	Reduz a visibilidade, irritação nos olhos, no trato respiratório e pulmões e danos a vegetação.
Toxicidade terrestre	Local	Os produtos químicos tóxicos com uma concentração letal para roedores	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Redução da biodiversidade.
Toxicidade aquática	Local	Os produtos químicos tóxicos com uma concentração letal para peixes	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Redução da biodiversidade aquática e diminuição da pesca comercial e recreativa.
Saúde Humana	Local e regional	Total de emissões para o ar, água e solo.	Converte os dados do inventário em substância tóxica equivalente.	Aumento da morbidade e mortalidade.
Esgotamento de recursos	Local, regional e global	Quantidade de minerais utilizados e a quantidade de combustíveis fósseis utilizados.	Converte os dados do inventário para uma quantidade proporcional dos recursos utilizados versus a quantidade de recurso na reserva.	Redução de recursos para a geração futura.
Uso da terra	Local, regional e global	Quantidade eliminada em aterro ou outras modificações na terra.	Converte a massa de resíduos sólidos em volume usando uma densidade estimada.	Perda de habitat terrestre para a vida selvagem e diminuição do espaço do aterro.

Uso da água	Local e regional	Água utilizada ou consumida.	Converte os dados do inventário para uma quantidade proporcional de água utilizada versus a quantidade de recurso na reserva.	Perda de água disponível a partir de fontes de água subterrâneas e superficiais.
-------------	------------------	------------------------------	---	--

Fonte: EPA (2006).

Essas categorias norteiam o desenvolvimento dos métodos de análise, padronizam as formas de obterem os resultados e servem de base para o aprimoramento dos métodos de avaliação dos estudos ambientais.

2.7.9. Interpretação

Tavares (2006) aponta que é na fase de interpretação onde se tem as respostas para as questões levantadas no escopo da ACV, e, ainda, obtém-se as constatações que podem contribuir na tomada de decisão acerca da melhoria ambiental do produto estudado.

3. METODOLOGIA E FORMA DE ANÁLISE DOS DADOS

Essa pesquisa é delimitada ao estudo da influência do transporte no ciclo de vida de tubulações de PVC e PEX para a execução de sistemas prediais de água fria. Sobre o ponto de vista metodológico, em função da abordagem de análise, esse estudo é classificado como qualitativo e quantitativo, tendo em vista que o objeto estudado consiste em descrever, qualificar e quantificar o processo de transporte das tubulações e as emissões advindas dessa etapa do ciclo de vida desses materiais (SILVEIRA E CÓRDOVA, 2009).

Em relação aos objetivos, pode-se classificar essa pesquisa em descritiva aplicada, onde é realizada a análise e interpretação dos fatos sem a interferência do pesquisador, tal qual determinado por Barros e Lehfeld (2007). Faz parte dos procedimentos metodológicos a utilização de bases de dados internacionais que representam a realidade ambiental da indústria e comércio da construção civil.

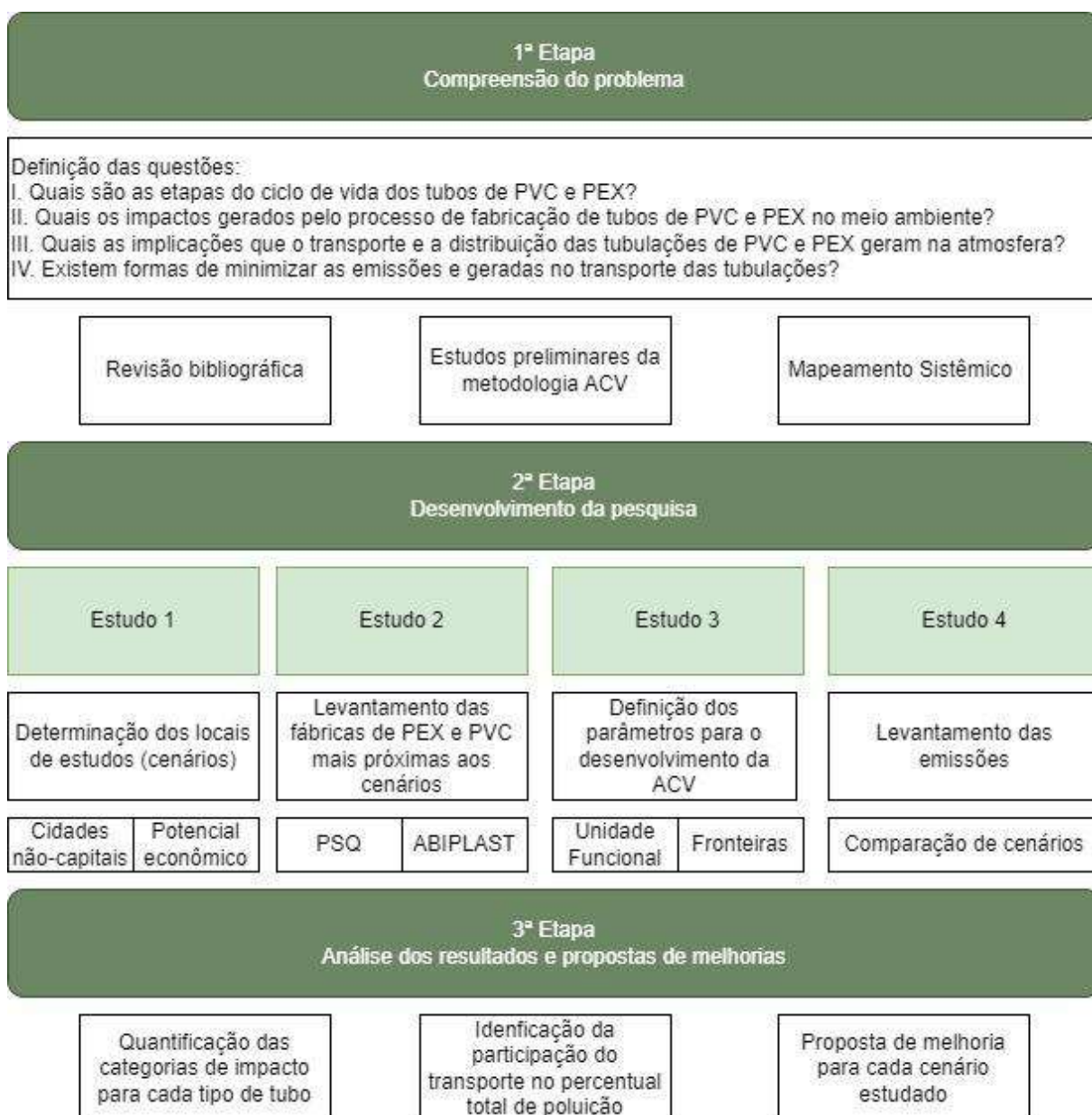
A avaliação das informações levantadas será realizada a partir da interpretação crítica dos resultados obtidos, o que envolve o entendimento da causa e efeito da ocorrência de

fenômenos, assim como a influência de diversas variáveis sobre a intensidade de ocorrência dos mesmos.

3.1. Delineamento da pesquisa

A metodologia é desenvolvida em três etapas principais: 1) compreensão do problema; 2) desenvolvimento da pesquisa; e 3) análise dos resultados e propostas de melhorias, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Delineamento geral da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2. Compreensão do problema

Essa etapa se iniciou com a realização de um mapeamento sistêmico que buscou avaliar o panorama das pesquisas que abordam a avaliação do ciclo de vida do PVC e do PEX. Esse levantamento inicial permitiu a identificação dos procedimentos de fabricação das tubulações, os parâmetros necessários para o desenvolvimento de ACVs para materiais da construção civil e a definição das questões que norteiam a pesquisa, fatores que fomentam o avanço da revisão bibliográfica.

3.3. Determinação dos locais de estudo

Tendo em vista as dimensões continentais do Brasil, a desigualdade de infraestrutura entre regiões e buscando uma melhor amostragem da real situação do país na distribuição de tubulações, foram escolhidas cinco cidades brasileiras, conforme mostrado na Tabela 5 e Figura 12, cada qual em uma região do país, para compor um cenário de estudo. As localidades escolhidas são cidades que, mesmo não sendo capitais, são responsáveis por uma importante parcela PIB dos respectivos estados em que pertencem e, ainda, se apresentam como centros econômicos interiorizados, servindo como pontos de apoio para cidades menores.

Tabela 5 – Cenários de estudo.

Cenário	Cidade	PIB (<i>per capita</i>)
I	Parauapebas/PA	110.604,10
II	Catalão/GO	64.326,38
III	Parnaíba/PI	17.163,13
IV	Caxias do Sul/RS	52.873,85
V	Osasco/SP	117.298,82

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 12 – Cenários de Estudo.



Fonte: Autoria própria (2022).

A cidade de Parauapebas, localizada no estado do Pará, distante 719 km da capital Belém, de acordo com a Figura 13, possui uma população de mais de 270 mil pessoas e, com isso, é a 3ª cidade não capital mais populosa da região norte do país (IBGE, 2022). A Serra dos Carajás, conhecida como a maior província mineralógica do planeta, tem grande parte do seu território na cidade, o que faz de Parauapebas um dos principais polos na exploração de minério de ferro, manganês, cobre, ouro e níquel do mundo (TEIXEIRA; LINDENMAYER, 2012).

Figura 13 – Localização da cidade de Parauapebas/PA (Cenário I).



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2023).

Catalão está situada no estado de Goiás, conforme Figura 14, e é responsável pelo quinto maior PIB do estado (IBGE, 2022). Sua economia gira entorno da indústria automobilística, da agropecuária, centro universitários e do minério, sendo esse último responsável pela maior província mineralógica goiana (IBGE, 2022). Possui um ramal da Ferrovia Centro Atlântica (FCA), interligando a região aos portos de Santos/SP e Vitória/ES. Ainda, esse município é o menos desigual, de acordo com o Coeficiente de Gini, entre todas as cidades goianas com mais de 30 mil habitantes, o que mostra um reflexo significativo no padrão da população em geral (IMB, 2022).

Figura 14 – Localização da cidade de Catalão/GO (Cenário II).



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2023).

O município de Parnaíba, Figura 15, é o segundo mais populoso do estado do Piauí, com aproximadamente 164 mil habitantes, ficando atrás apenas da capital Teresina. No ano de 2011, Parnaíba foi a cidade brasileira com o maior crescimento econômico, sendo os setores da indústria e serviços responsáveis por 97% do PIB do local (IBGE, 2020). O Delta do Parnaíba, local de encontro de rios com o oceano, atrai milhares de turistas para a região, o potencializando ainda mais a economia da cidade (SILVA, 2020).

Figura 15 - Localização da cidade de Parnaíba/PI (Cenário III).



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2023).

Localizada no nordeste gaúcho (Figura 16), Caxias do Sul é a segunda cidade mais populosa do Rio Grande do Sul e a primeira da Serra Gaúcha (IBGE, 2022). Responsável pelo maior Índice de Desenvolvimento Socioeconômico (IDESE) do estado, a cidade conta com 100% de abastecimento de água tratada para a população e possui a terceira melhor educação do sul brasileiro. A indústria e o setor de serviços são os ramos de atividade predominantes no município.

Figura 16 - Localização da cidade de Caxias do Sul/RS (Cenário IV).



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2023).

Osasco possui a segunda maior economia do estado de São Paulo e é a cidade não capital com o maior PIB brasileiro, ficando à frente de inúmeras outras capitais estaduais (IBGE, 2022). Localizada próximo a grande São Paulo, conforme Figura 17, mantém o Parque Industrial de Osasco, região com mais de 600 indústrias de médio e grande porte responsáveis por grande volume de exportação, ganhando destaque o ramo de metalurgia pesada (SEPLAD, 2021). E, ainda, é considerada como a terceira melhor cidade brasileira para empreender e desenvolver novos negócios.

Figura 17 - Localização da cidade de Osasco/SP (Cenário V).



Fonte: Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (2023).

Dessa forma, tendo em vista a importância econômica dessas cidades e as particularidades de cada uma em relação ao acesso de insumos para a construção civil, será avaliado as distâncias de transporte percorridas para a distribuição de tubulações nessas localidades. Os locais de aplicação das tubulações serão posicionados, hipoteticamente, na região central das cidades estudadas, tendo em vista uma melhor amostragem da distribuição do material na região.

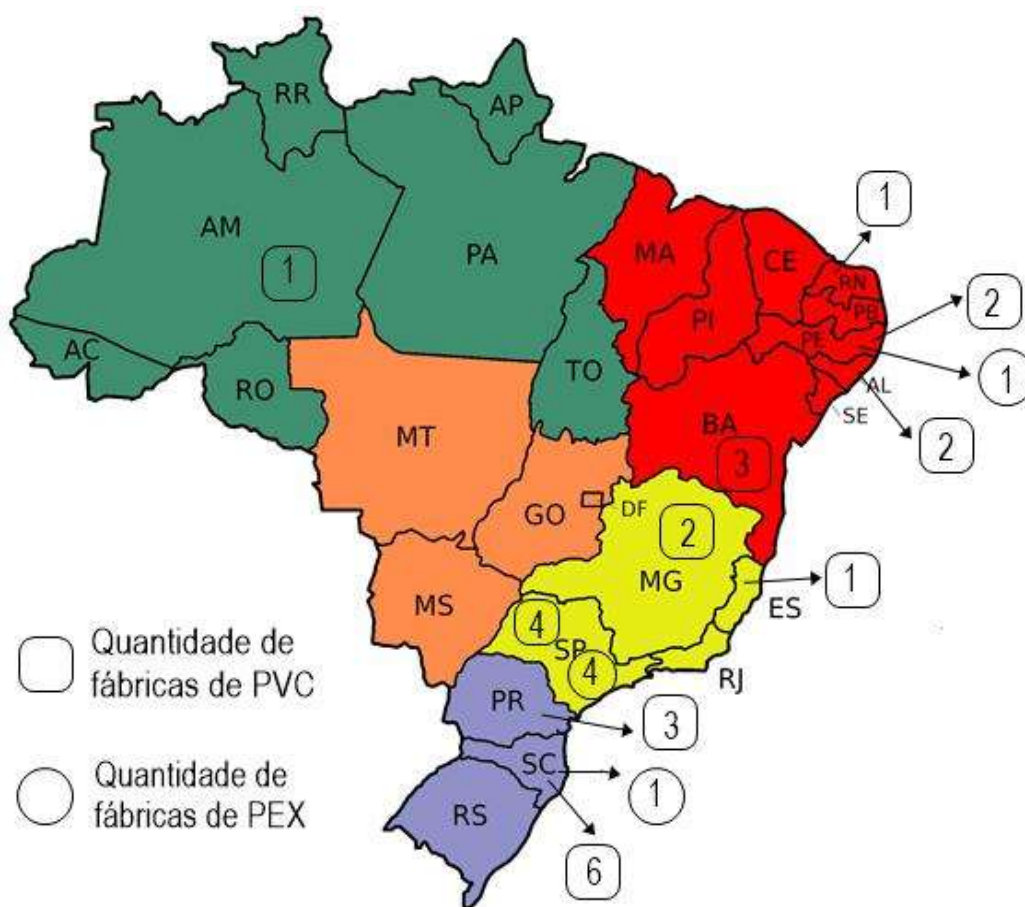
3.4. Levantamento de fábricas de PEX e PVC

Para o levantamento das fábricas de tubos de PVC foram utilizadas aquelas qualificadas pelo Programa Setorial da Qualidade (PSQ) de Tubos e Conexões de PVC para Sistemas Hidráulicos Prediais, desenvolvido pelo Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H) (BRASIL, 2022), que tem por finalidade a comprovação da qualidade de materiais e o cumprimento às normas brasileiras quanto a eficiência e produtividade.

Tendo em vista que ainda não se tem um PSQ para tubulações em PEX, o levantamento das fábricas desse material foi realizado tomando por base as empresas vinculadas à Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2022), entidade que representa esse setor perante aos órgãos governamentais.

A Figura 18 apresenta as quantidades de cada fábrica identificada e sua localização no país. Vale considerar que podem existir outras empresas e filias localizadas que não foram contabilizadas, tendo em vista os parâmetros de busca expostos e adotados nessa pesquisa.

Figura 18 – Localização das fábricas no país.



Fonte: Autoria própria (2023).

Foram localizadas 25 fábricas de PVC, distribuídas entre 10 estados brasileiros, sendo Santa Catarina o que possui mais indústrias voltados para esse mercado. A região sul é a que apresenta mais fábricas desse material, seguida pelo nordeste e sudeste. As fábricas de PEX somam apenas 6, sendo que 4 delas estão localizadas em São Paulo, uma no Paraná e uma no Pernambuco. Não foram identificadas fábricas de nenhum material na região centro-oeste.

Em posse da relação dos fabricantes e seus respectivos endereços é possível verificar a distribuição das fábricas pelo país e as distâncias de transporte das tubulações até os cenários de estudo. Tendo em vista que, quanto maior o percurso maior será as emissões de gases poluentes na atmosfera, as fábricas utilizadas para cada cenário serão determinadas levando em consideração aquela que mais se aproxima da cidade estudada.

O modal rodoviário será adotado nesse estudo, tendo em vista que ele é o mais utilizado no país para o escoamento de mercadorias. Assumiu-se ainda um caminhão de dois eixos transportando uma carga de lotação máxima, com as tubulações dispostas de acordo com a Figura 19.

Figura 19 – Modelo de veículo e disposição das tubulações para carga.



Fonte: ABEP (2013).

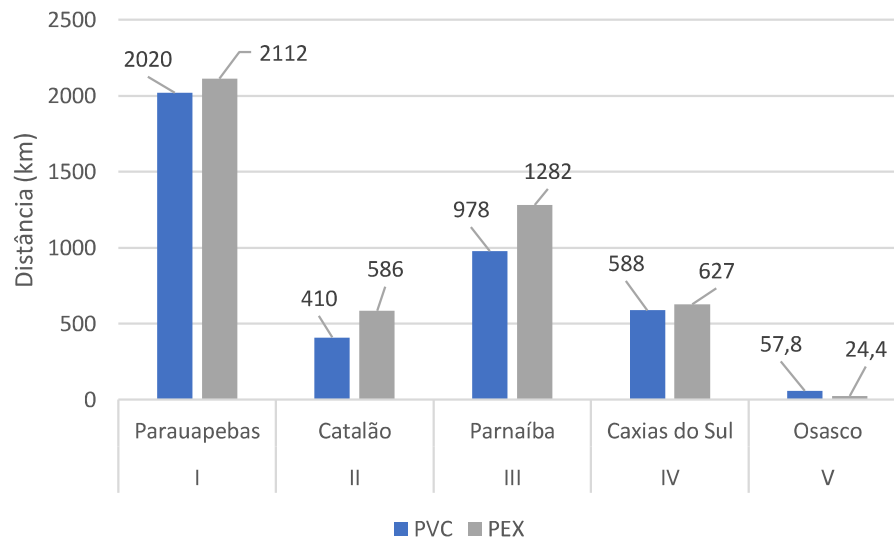
As distâncias entre fábrica e o cenário estudado serão determinadas por meio do *Google Maps* (2022), sendo a origem preenchida pelo endereço da fábrica mais próxima e o campo de destino pelo nome da cidade. A Tabela 6 apresenta a fábrica mais próxima de cada cenário avaliado e a quilometragem percorrida para a distribuição dos materiais, enquanto a Figura 20 mostra a comparação das distâncias entre os cenários.

Tabela 6 – Fábricas mais próximas e distâncias de transporte.

PVC			
Cenário	Cidade	Fábrica mais próxima	Distância de transporte (km)
I	Parauapebas	Escada/PE	2020,00
II	Catalão	Cedral/SP	410,00
III	Parnaíba	Macaíba/RN	978,00
IV	Caxias do Sul	Joinville/SC	588,00
V	Osasco	Cabreúva/SP	57,80
PEX			
Cenário	Cidade	Fábrica mais próxima	Distância de transporte (km)
I	Parauapebas	Cabo de Santo Agostinho/PE	2112,00
II	Catalão	Sumaré/SP	586,00
III	Parnaíba	Cabo de Santo Agostinho/PE	1282,00
IV	Caxias do Sul	Joinville/SC	627,00
V	Osasco	Vila Maria/SP	24,40

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 20 – a) distância percorrida pelo PVC e b) distância percorrida pelo PEX.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 21 mostra o mapa das trajetórias percorridas para cada material em seu respectivo cenário.

Figura 21 – Trajetos para cada cenário d

MAPA DAS TRAJE

LEGENDA

- Percurso do Cenário I - PVC
- Distância do Cenário II - PVC
- Percurso do Cenário III - PVC
- Distância do Cenário IV - PVC
- Distância do Cenário V - PVC
- Percurso do Cenário I - PEX
- Distância do Cenário II - PEX
- Percurso do Cenário III - PEX
- Distância do Cenário IV - PEX
- Distância do Cenário V - PEX

Par

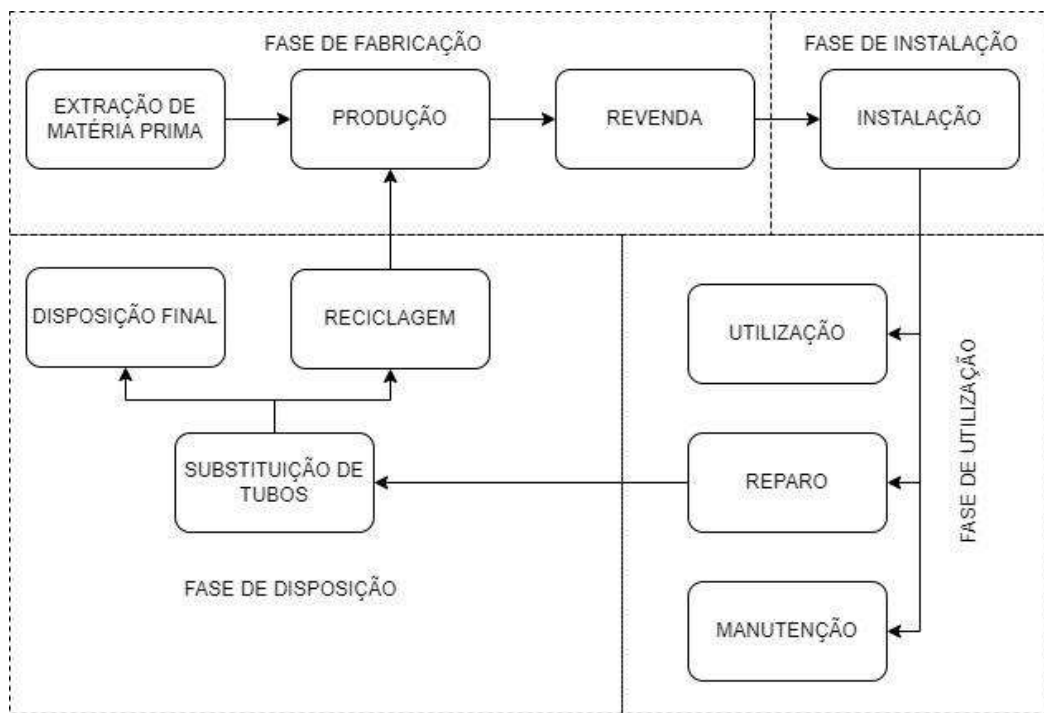


3.5. Definição dos parâmetros para a elaboração da ACV

Na busca da identificação do comportamento ambiental dos tubos de PVC e PEX faz-se necessário o conhecimento do sistema de produto, isto é, precisa-se compreender quais são as etapas que configuram o ciclo de vida dos materiais. Dotado desse conhecimento, é possível determinar qual a fronteira do sistema, isto é, delimitar, se não todas, quais as etapas do ciclo dos produtos que serão analisadas.

Dessa forma, elaborou-se a Figura 22 onde tem-se um modelo de ciclo de vida predominante para tubulações de água fria, sendo este fluxograma implementado pela junção dos protótipos definidos por Alsadi *et al.* (2020) e Vahidi *et al.* (2016).

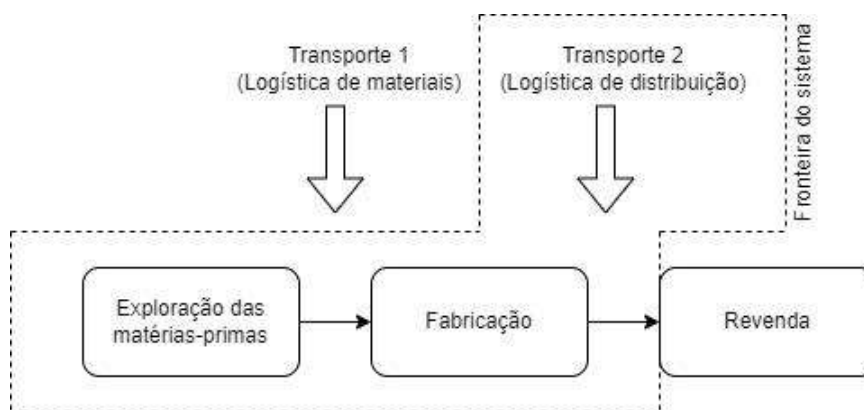
Figura 22 – Ciclo de vida de tubulações de água fria.



Fonte: Adaptado de Alsadi *et al.* (2020) e Vahidi *et al.* (2016).

Esse estudo terá como fronteira a fase de fabricação das tubulações, tendo em vista que, de acordo com Rosselló *et al.* (2010), é nessa etapa em que se tem as maiores emissões de substâncias tóxicas no ciclo de vida de materiais e, ainda, possui as maiores demandas de transporte (logística de materiais e logística de distribuição), conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Fronteira da ACV estudada.



Fonte: Autoria própria (2023).

A logística de materiais compreende a distância percorrida entre o local de extração das matérias-primas e a fábrica, enquanto que a logística de distribuição está vinculada com o fornecimento do produto fabricado aos locais de revenda/utilização. Levando em consideração que existem diferentes insumos na composição de uma mesma tubulação e que cada composição vem de locais distintos, esse estudo contemplará apenas a logística de distribuição.

Foram escolhidos tubos de PVC e de PEX com as especificações apresentadas na Figura 24 e na Tabela 7, visto que ambos os materiais possuem a mesma função no desenvolvimento do projeto de água fria.

Figura 24 – a) tubo PVC; b) tubo PEX.



Fonte: Amanco (2016).

Tabela 7 - Propriedades das tubulações estudadas.

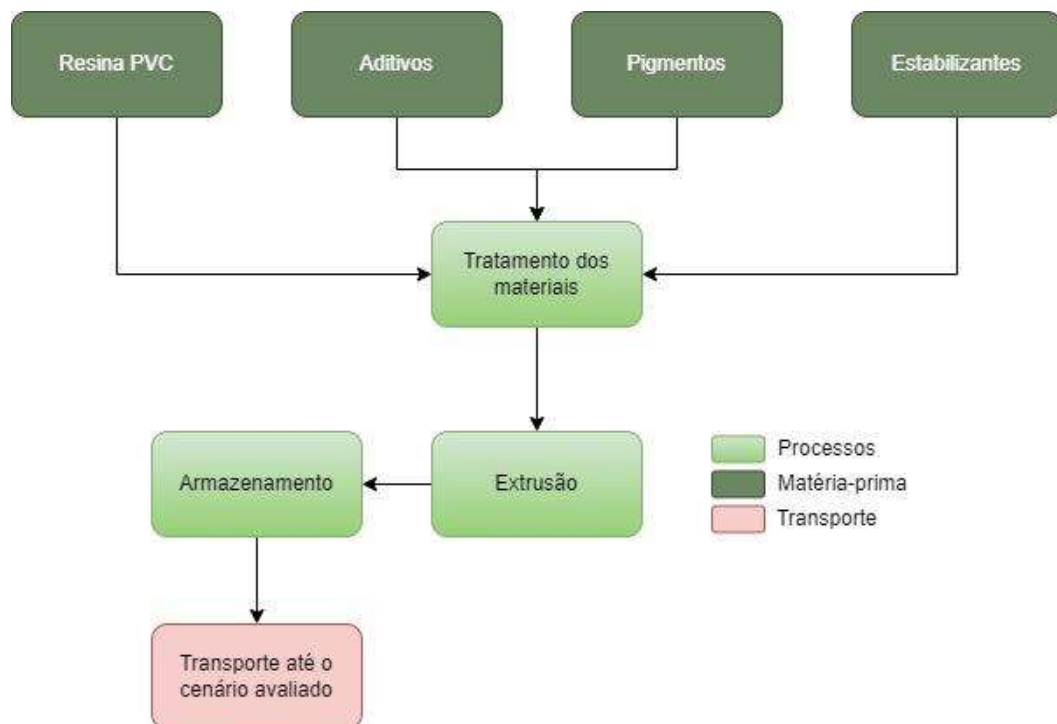
Propriedades	PVC	PEX
Diâmetro (mm)	32	32
Massa aproximada (kg/6m)	2,25 (Tigre, 2022)	1,54 (Astra, 2022)
Perdas	3% (TCPO, 2021)	0,5% (TCPO, 2021)

Fonte: Tigre (2022), Astra (2022) e TCPO (2021).

A ACV será modelada na unidade funcional de 6 metros para ambos os materiais, sendo desconsideradas quaisquer conexões, junções, adesivos de união e anéis de vedação.

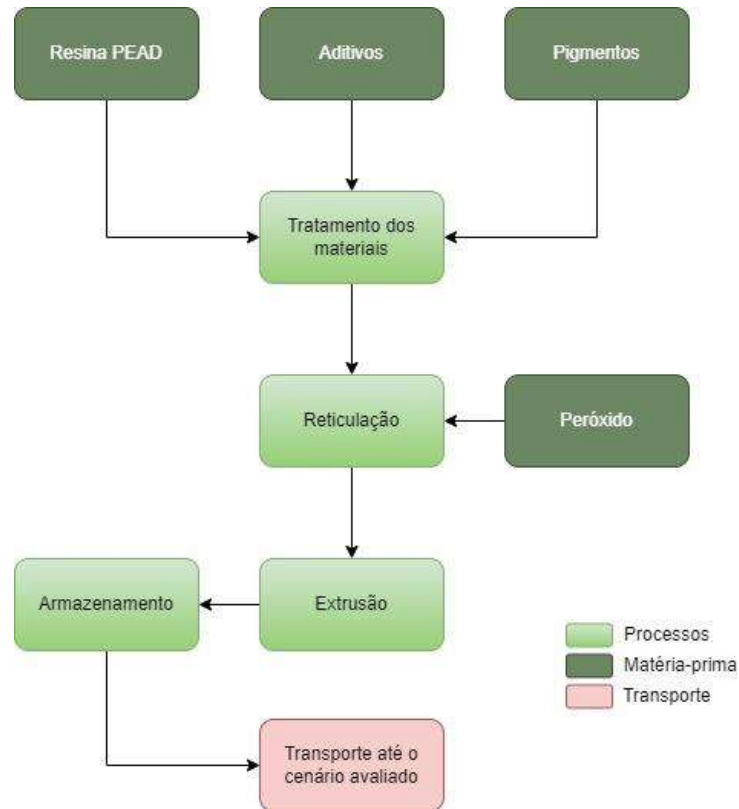
A constituição do ICV no tocante aos procedimentos e transformações industriais seguirá o estipulado por Coughlan e Hug (1986), Rodolfo Junior *et al.* (2006) e Pennafort Junior *et al.* (2013). As Figuras 25 e 26 mostram o processo de produto do PVC e PEX, respectivamente, utilizados para a elaboração da ACV.

Figura 25 – Sistema de produto: tubo PVC.



Fonte: Adaptado de Coughlan e Hug (1986) e Rodolfo Junior *et al.* (2006).

Figura 26 – Sistema de produto: tubo PEX.



Fonte: Adaptado de Pennafort Junior *et al* (2013).

Apesar de existirem outras formas de conformar e obter as tubulações, Teixeira *et al.* (2017) pontuam que o processo de extrusão é o mais utilizado nesse ramo industrial por apresentar simplicidade no manejo do equipamento e desempenhar rapidez no procedimento.

O *software OpenLCA* foi utilizado para o desenvolvimento da ACV, tendo em vista que disponibiliza utilização gratuita, interface intuitiva e viabilidade de licença estudantil para utilização dos bancos de dados disponíveis. As bases de dados adotadas foram *Ecoinvent v3.5* e *Industry Data v2.0*, tal qual os estudos de Marson *et al.* (2021), Xiong *et al.* (2020) e Alsadi *et al.* (2016), pois contemplam uma ampla abrangência de matérias-primas e é perceptível uma rotineira utilização dessas fontes de dados em estudos que envolvem materiais da construção civil.

O *OpenLCA* funciona de modo interativo, onde o usuário informa quais são os materiais (entradas) que forma a composição do material estudado e as suas respectivas quantidades, então é processado as informações e apresentado o resultado do ciclo de vida, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Esquema de funcionamento do *software OpenLCA*.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para o PVC a entrada de dados no programa seguirá o estipulado pelos estudos do Instituto de Ciência dos Plásticos e Teses de Plásticos (IKP, 2003), da Alemanha, e o Instituto de Desenvolvimento de Produtos (IPU, 2000), da Dinamarca, sendo utilizada a média entre os valores estipulados por cada instituição na composição dos tubos de PVC e, no caso de não constar a informação em uma das bases, o valor simples, tal qual mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição dos tubos de PVC em percentual de massa (kg).

	Material	IPU, 2000	IKP, 2003	Média
	Resina de PVC	92,1	94	93,05
Aditivos	Sulfato de chumbo tribásico	1,4	-	1,4
	Estearato de chumbo dibásico	0,5	-	0,5
	Estearato de chumbo	0,2	1,1	0,65
	Estearato de cálcio	0,4	-	0,4
	Filler	-	3,8	3,8
	Calcário em pó	4,7	0,18	2,44
	Ácido esteárico	0,1	-	0,1
	Cera endurecida sintética	0,1	-	0,1
	Parafina (lubrificante)	-	0,7	0,7
	Pigmentos	Negro de fumo	0,5	0,02
Óxido de titânio		-	0,2	0,2

Fonte: IKP (2003) e IPU (2000).

Enquanto que para as tubulações PEX tem-se a composição utilizada tal qual definida por Silva (1999) e mostrada na Tabela 9. Os valores estão em percentual de massa (kg). O item “outros produtos químicos inorgânicos” apresenta incerteza em seus materiais e por esse motivo foi desconsiderado na entrada de dados no *OpenLCA*.

Tabela 9 – Composição dos tubos de PEX em percentual de massa (kg).

Material	Silva (1999)
Resina de PEAD	88
Hidróxido de sódio	0,23
Ácido sulfúrico	0,67
Filme plástico	0,2
Alumínio	1,36
Aditivos	
Acetona	1,38
Peróxido	3,64
Permanganato de potássio	0,49
Óleos lubrificantes	1,3
Outros produtos químicos inorgânicos	2,71
Pigmentos	
Negro de fumo	0,02

Fonte: Silva (1999).

A AICV foi elaborada com base no método de análise *CML IA 4.1*, conforme indicação do estudo das Recomendação de Modelos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro (UGAYA *et al.*, 2019). O *CML IA 4.1* é uma variante do *CML*, modelo adotado e aconselhado para uso pela norma inglesa EN 15804 (BRE, 2012), que trata da sustentabilidade e serviços na construção civil. A Tabela 10 mostra as categorias de impacto que serão estudadas nessa ACV.

Tabela 10 - Categorias de impactos a serem consideradas na ACV.

Categorias de impacto	Unidade de medida
Potencial de acidificação	kg SO ₂ -Eq
Mudança Climática - GWP 20a	kg CO ₂ -Eq
Esgotamento de Recursos Abióticos	kg antimony-Eq
Potencial de Eutrofização	kg NO _x -Eq
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce - FAETP 20a	kg 1,4-DCB-Eq
Ecotoxicidade de Sedimentos de Água Doce - FSETP 20a	kg 1,4-DCB-Eq
Toxicidade Humana - HTP 20a	kg 1,4-DCB-Eq
Radiação ionizante	DALYs
Mau cheiro do ar	m ³ air
Ecotoxicidade Aquática Marinha - MAETP 20a	kg 1,4-DCB-Eq
Ecotoxicidade de Sedimento Marinho - MSETP 20a	kg 1,4-DCB-Eq
Depleção de ozônio estratosférico - ODP 20a	kg CFC-11-Eq
Ecotoxicidade Terrestre - TAETP 20a	kg 1,4-DCB-Eq

Fonte: Autoria própria (2023).

A interpretação dos resultados dar-se-á de forma interativa com as outras três etapas da ACV e tem por meta a busca da identificação de questões significativas que envolvem os impactos diagnosticados, analisando a consistência dos dados obtidos, levantando recomendações de melhorias na cadeia produtiva das tubulações, principalmente a respeito da logística de distribuição conforme NBR ISO 14044 (ABNT, 2014).

3.6. Levantamento dos impactos ambientais

A ACV resultará no levantamento da poluição gerada na fronteira de estudo, sendo avaliado o percentual de liberação de poluentes advindos do transporte em relação às emissões gerais para cada cenário, analisando quais as influências da localização geográfica e da forma de distribuição dos materiais no impacto ao meio ambiente, propondo sempre que possível, alternativas para reduzir as emissões do sistema de produto estudado.

O quantitativo de poluentes detectados será comparado com aquelas já encontrados em estudos anteriores, avaliados quanto à sua escala de impacto (local, geral ou global) ao meio ambiente e seus reflexos no cotidiano das pessoas.

4. RESULTADOS

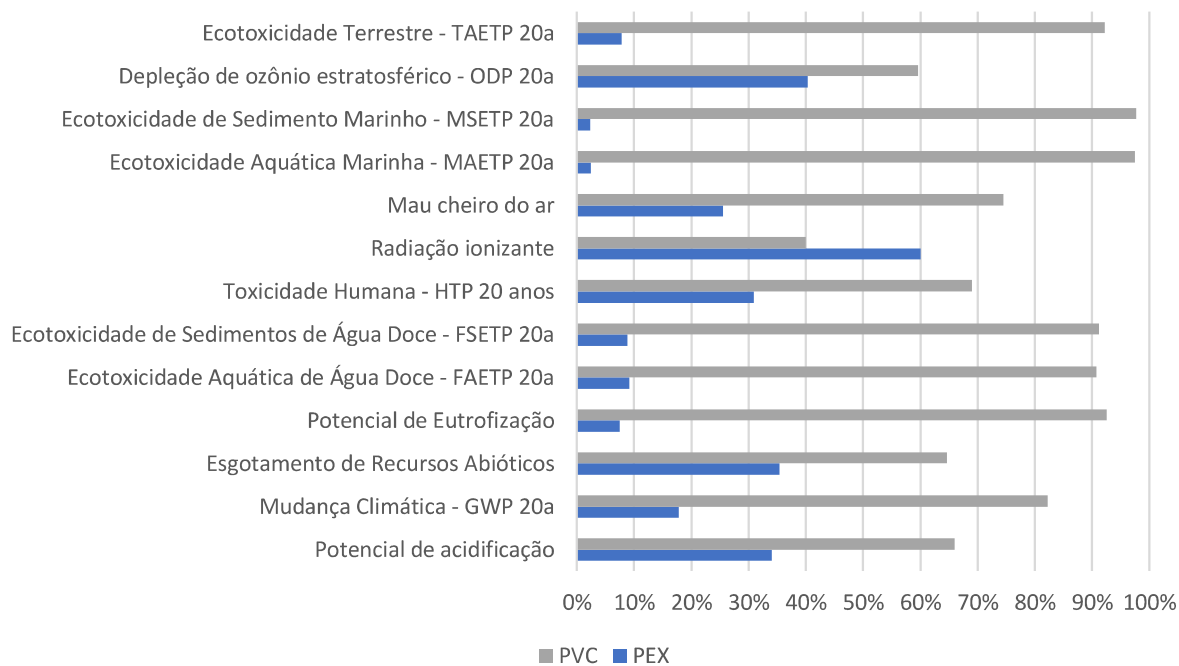
Do inventário das fábricas pode-se observar um desequilíbrio entre a quantidade de fabricantes de PEX e PVC, sendo este último o de maior número no território brasileiro. Tal realidade pode ser explicada levando em consideração que a demanda por tubulações de PVC nas construções brasileiras é muito superior à de PEX, tendo em vista a pouca disseminação do polietileno na execução de sistemas hidráulicos prediais, a escassez e a exigência de mão de obra especializada.

Apesar de muitas fábricas de PVC, e mesmo as poucas de PEX, é notável uma concentração da produção entre as regiões sul, sudeste e nordeste, o que gera uma maior mobilização para a distribuição dessas tubulações para o interior do país, corroborando com a ideia de que as regiões brasileiras são desiguais no desenvolvimento tecnológico e, conseqüentemente, industrial.

Com relação ao ciclo de vida, inicialmente foi analisado o comportamento ambiental de cada uma das tubulações desprezando as influências do transporte, tendo em vista que esse

estudo se faz necessário para identificar, posteriormente, com a inserção das distâncias de locomoção, qual o percentual do transporte na geração de poluentes. O resultado dessa avaliação pode ser visto na Figura 28, onde se tem um gráfico de barras mostrando a porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto.

Figura 28 - ACV sem considerar o transporte.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na análise que desconsidera o transporte, o PVC se mostrou como o material com os maiores índices de poluição, ficando à frente em 12 das 13 categorias de impacto estudadas. Isso mostra que esse tipo de tubulação possui, em seu processo de fabricação, procedimentos que, quando comparados com a produção de PEX, produz uma quantidade maior de substâncias tóxicas ao meio ambiente e recursos naturais. Tal realidade pode ser explicada tendo em vista a maior quantidade de substâncias na composição do PVC, o que exige processos de transformação e misturas com um maior consumo energético.

É importante ressaltar que, de acordo com Zanghelini *et al.* (2017), existem categorias de impactos que são mais significativas que outras. Isto é, certas categorias apontam para problemas considerados mais graves como, por exemplo, a categoria que avalia a depleção da camada de ozônio é mais relevante para um estudo ambiental do que a que analisa o mau cheiro do ar (FIORI *et al.*, 2014). Contudo, enxergando que todas as categorias de impacto convergem

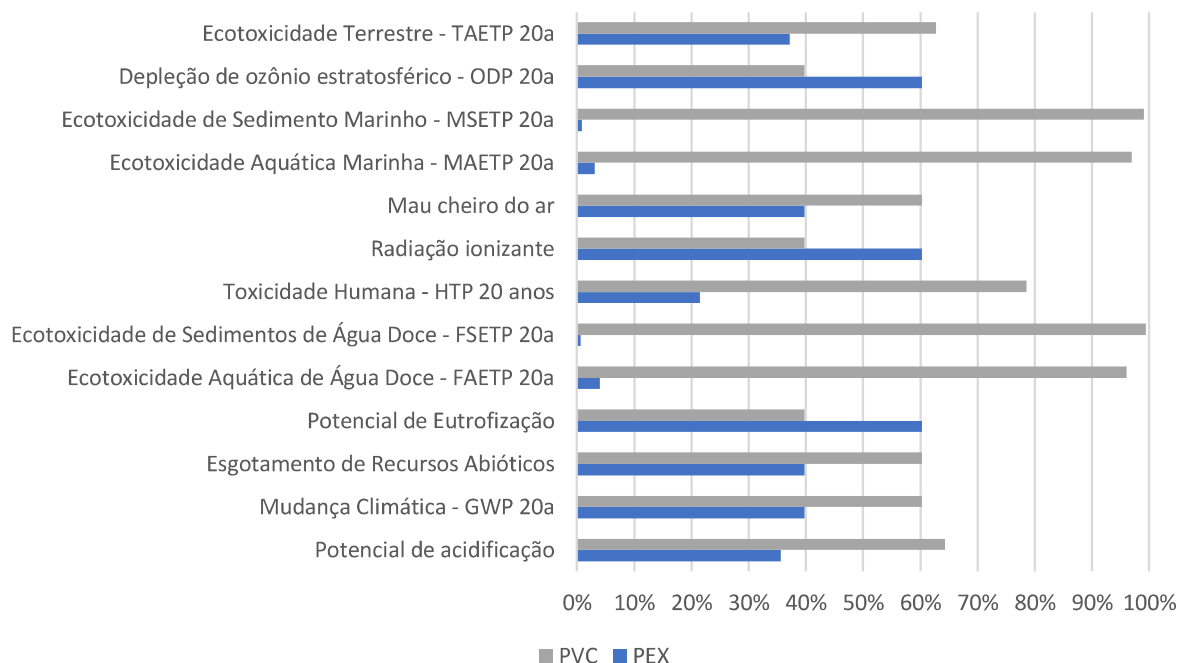
para problemas que afetam o meio ambiente e compromete a vida dos seres vivos, o conhecimento do comportamento de cada uma se torna importante para caracterizar a conduta ambiental dos materiais.

Adiante será apresentada as ACVs implementadas para cada cenário, considerando as distâncias percorridas entre o local da fábrica e o ponto de utilização, comparando quantas categorias cada produto se mostra mais poluente que o outro, apontando as questões observadas com maior relevância e propondo, sempre que possível, alternativas de otimização na logística de distribuição em análise e apresentando o percentual de CO₂ emitido em relação ao total geral de dióxido de carbono identificado para cada cenário.

4.1. Cenário I – Parauapebas/PA

O cenário I compreende as maiores distâncias de transporte dentre os cenários estudados, são 2020 km para a fábrica de PVC e 2121 km para a fábrica de PEX. Apesar da pouca diferença, o PVC se mostrou mais poluente em 10 das 13 categorias de impacto avaliadas, sendo os quesitos que envolvem a ecotoxicidade dos ecossistemas e da vida humana as com os índices de poluição com mais destaque, conforme mostrado na Figura 29 e na Tabela 11, onde se tem um gráfico de barras mostrando a porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto.

Figura 29 - Resultado da ACV do cenário I.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 11 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário I.

Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	3
Impacto do PEX < Impacto do PVC	10

Fonte: Autoria própria (2023).

Como as distâncias de trajeto são elevadas, obteve-se um alto percentual de liberação de CO₂ proveniente do transporte em relação às emissões totais da ACV materiais, sendo que 76% das liberações de todo o ciclo de vida das tubulações PEX são provenientes do processo de locomoção dos tubos, para o PVC essa porcentagem ficou em 73%, de acordo com a Figura 30.

Figura 30 – Participação do transporte na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário I.



Fonte: Autoria própria (2023).

Dessa forma, sendo de conhecimento que a utilização das tubulações em PVC para a execução de sistemas prediais de água fria é amplamente superior à do PEX no Brasil, observa-se que o cenário I, nas condições avaliadas, faz o uso de um material com potenciais de poluição maiores que do PEX e, buscando o ideal colaborativo entre a construção civil e o meio ambiente, a substituição dos tubos de PVC para as tubulações PEX resultaria na redução das emissões de GEE na região norte (cenário) e nordeste (fábrica), além de incorporar técnicas mais modernas e eficientes às obras advindas da utilização do polietileno reticulado.

As categorias de impacto em que o PVC apresentou maiores índices de poluição foram as que envolvem a ecotoxicidade do ecossistema. Sendo esse parâmetro uma importante ciência que analisa as influências de substâncias químicas artificiais sobre organismos vivos, estudando quais os prováveis impactos que a presença de agentes tóxicos pode causar sobre o desenvolvimento das espécies, um dos principais colaboradores para ecotoxicidade é a queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna nos transportes. Uma forma de colaborar com a diminuição da ecotoxicidade do ecossistema é a substituição de veículos antigos por mais novos e a reavaliação no modo de locomoção podem ser alternativas para reduzir os danos ao meio ambiente. Dessa forma, uma maneira de minimizar as emissões que colaboram com esse impacto seria a diminuição das distâncias de transporte ou a utilização de outros modais menos poluentes.

Levando em consideração que a região norte conta com inúmeros rios navegáveis, que o transporte por hidrovias é menos poluente que a locomoção rodoviária (CNT, 2021) e que já existem empresas que fazem o trajeto Manaus x Belém (AHIMOC, 2018), uma alternativa na distribuição dos tubos de PVC até o cenário I seria por meio do rio Amazonas, partindo de Manaus com destino a Santarém/PA, e desta cidade até Parauapebas por transporte rodoviário, conforme mostrado na Figura 31.

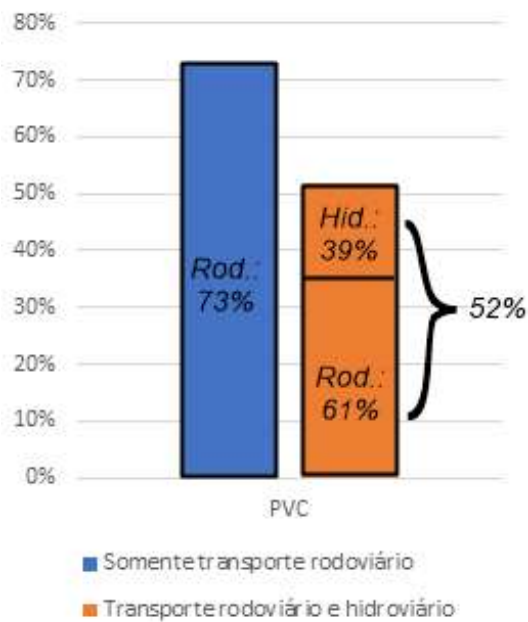
Figura 31 – Alternativa de distribuição de PVC para o cenário I.



Fonte: Google Maps adaptado (2023).

Essa nova logística de distribuição proporcionaria uma intermodalidade no transporte do PVC, navegando 756 km pelo rio Amazonas e tráfegando 1225 km pela BR-230. O novo trajeto seria de 1981 km, 39 km a menos que pela fábrica de Pernambuco. A nova rota apresenta uma diminuição de 21% nas emissões de CO₂ advindas do transporte do PVC, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Percentual de emissões de CO₂ do transporte por intermodalidade em relação às emissões do transporte somente por rodovia.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Dos 52% das emissões emitidas pela alternativa de intermodalidade, 39% é proveniente da locomoção navegável e 61% pelo transporte terrestre, evidenciando que a locomoção por hidrovias para a distribuição de cargas é uma opção mais sustentável que os caminhões.

O PVC, da forma como foi avaliado inicialmente, se mostrou com maiores índices de poluição. Contudo, com a sugestão de distribuição apresentada, passou a ser menos poluidor que o PEX, como mostrado na Tabela 12. As categorias em que o PVC ainda continua sendo mais poluidor que o PEX são aquelas em que se mede a ecotoxicidade dos ambientes aquáticos. Tal análise mostra que o transporte, para esse cenário, está intimamente ligado com o potencial de poluição dos materiais.

Tabela 12 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental do PVC e PEX para o cenário I utilizando a intermodalidade de transporte.

Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	7
Impacto do PEX < Impacto do PVC	6

Fonte: Autoria Própria (2023).

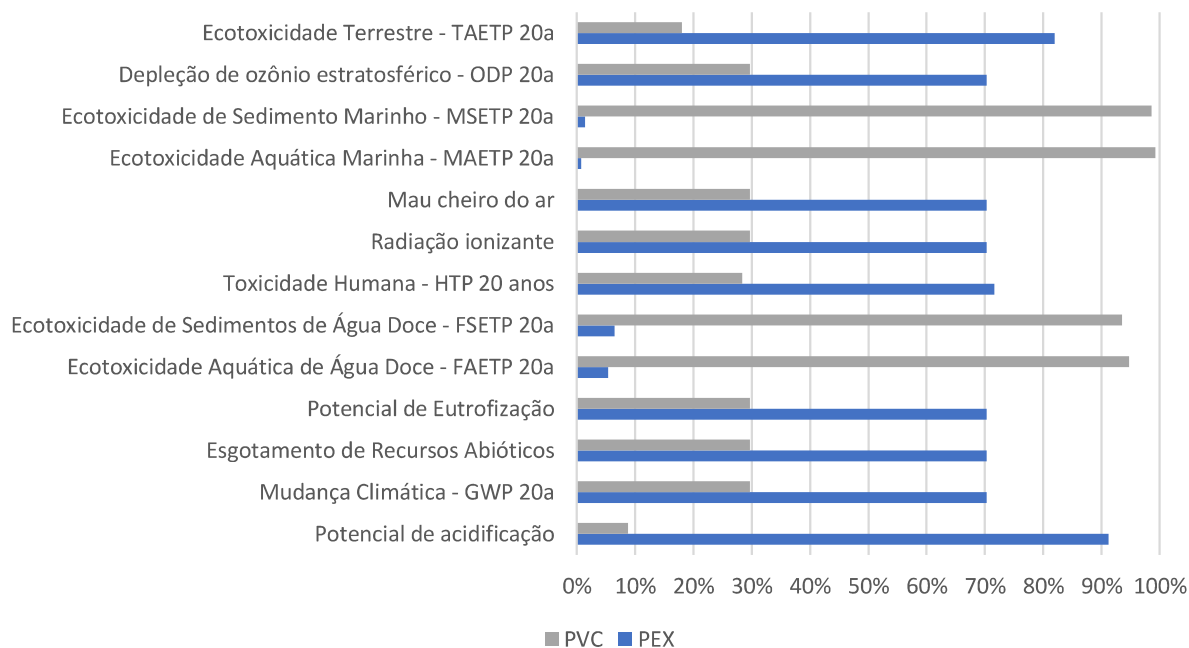
Ainda, caso existisse uma fábrica de PEX na cidade de Manaus/AM que utilizasse a alternativa de logística apontada aqui, ter-se-ia uma redução ainda maior na emissão de gases poluentes para esse além de que uma fábrica nessa região contribuiria com a descentralização da produção de PEX no litoral brasileiro.

4.2. Cenário II – Catalão/GO

Este cenário de estudo está localizado no centro-oeste brasileiro, região que não computou nenhuma fábrica de ambos os tipos de tubulações para os parâmetros utilizados no levantamento. Entretanto, apesar de não existirem fabricantes nesse local, o posicionamento centralizado no país propiciou a Catalão/GO trajetórias de baixa quilometragem quando se comparado aos demais locais de estudo.

A ACV para esse panorama resultou nas tubulações de PEX a frente das de PVC em 9 categorias, conforme mostrado na Figura 33, onde se tem um gráfico de barras 100% empilhadas mostrando a porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto, e na Tabela 13.

Figura 33 - Resultado da ACV do cenário II.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 13 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário II.

Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	9
Impacto do PEX < Impacto do PVC	4

Fonte: Autoria própria (2023).

A liberação de dióxido de carbono proveniente do transporte atingiu um percentual de 21% para o PEX e 14% para o PVC, de acordo com a Figura 34. Esses números são inferiores aos encontrados no cenário I, contudo ainda são índices relevantes para estudos ambientais.

Figura 34 - Participação do transporte na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário II.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na busca da otimização da logística de distribuição do PVC e PEX para o cenário II esbarra-se no contexto histórico da implantação da Estrada de Ferro no estado de Goiás, empreendimento que teve como objetivo a interligação da região central do país com o litoral paulista no século XX. A antiga Estrada de Ferro, hoje chamada de Ferrovia Centro Atlântica (FCA), se inicia em um entroncamento com a ferrovia Norte-Sul, passa pelo sudoeste e centro goiano, tendo um ramal de interligação na cidade de Catalão, e se estende até a cidade de Paulínia/SP, conforme mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Malha ferroviária da FCA.



Fonte: VLI (2023).

Pois bem, tendo em vista a existência de infraestrutura ferroviária que atende o cenário avaliado e viabiliza a logística de distribuição de insumos na região, será simulado um novo ciclo de vida que utiliza o transporte por trilhos para a movimentação das tubulações. Nessa demonstração será considerado os efeitos do transporte da mesma unidade funcional para ambos os materiais estudados.

As fábricas mais próximas que fornecem os tubos para o cenário de Catalão estão localizadas no estado de São Paulo, sendo Sumaré para o PEX e Cedral para o PVC. Sabendo que a FCA e seus ramais passam pelos perímetros urbanos de ambas as cidades das fábricas, será considerado, para fins de quilometragem, que o carregamento dos tubos é realizado diretamente no trem, dispensando a utilização de transporte rodoviário até terminais de cargas.

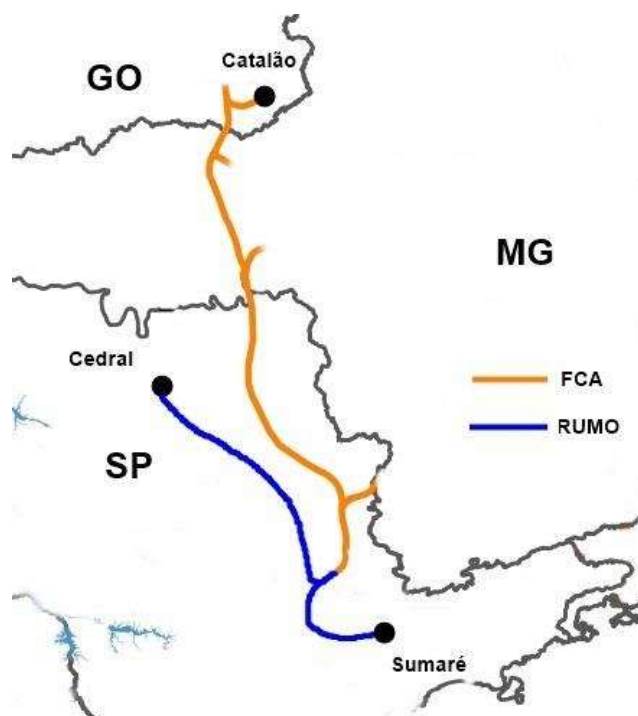
A Tabela 14 apresenta as novas distâncias percorridas até o cenário em questão e a Figura 36 detalha a trajetória realizada pelos materiais.

Tabela 14 – Distâncias de transporte por ferrovia.

Material	Origem	Destino	Distância (km)
PVC	Cedral/SP	Catalão/GO	715
PEX	Sumaré/SP	Catalão/GO	632

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 36 – Percurso por ferrovia.



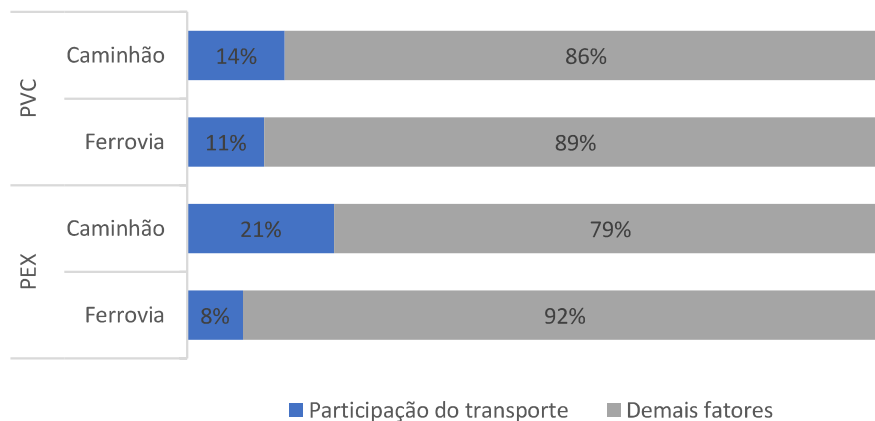
Fonte: ANTF adaptado (2023).

A rota alternativa de realização da logística de distribuição das tubulações aumentou a quilometragem percorrida para as duas tubulações, visto que o traçado de ferrovias tende a possuir diversos trechos sinuosos para vencer declividades acentuadas. Ainda, o tempo de deslocamento pela ferrovia também é superior ao tempo gasto pelo percurso com caminhão, pois a velocidade média de trens é mais baixa que a de veículos automobilísticos.

O novo percentual de emissões de poluentes pela mudança do meio de transporte foi inferior aos já determinadas, conforme apresentado na Figura 37. Para ambos os materiais se obteve uma melhoria no comportamento ambiental, contudo a utilização do modal ferroviário foi mais eficaz para o PEX, reduzindo mais da metade das emissões da fase de transporte no ciclo de vida do material e, ainda, o polietileno reticulado passou a ser o material que menos

emite CO₂ na sua logística de distribuição, sendo assim o mais recomendado para a utilização sob a ótica avaliada.

Figura 37 – Comparação entre o transporte ferroviário e rodoviário na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário II.



Fonte: Autoria própria (2023).

Constata-se então que, para esse cenário, a substituição do transporte rodoviário por ferrovias seria uma opção favorável à melhoria ambiental dos dois tipos de materiais, visto que apresenta menores índices de poluição e emissão de partículas tóxicas, além de colaborar com a disseminação da diversidade de modais de transporte no território brasileiro, reduzir a quantidade de caminhões trafegando pelas estradas e fortalecer a competitividade do mercado de tubulações na região centro-oeste.

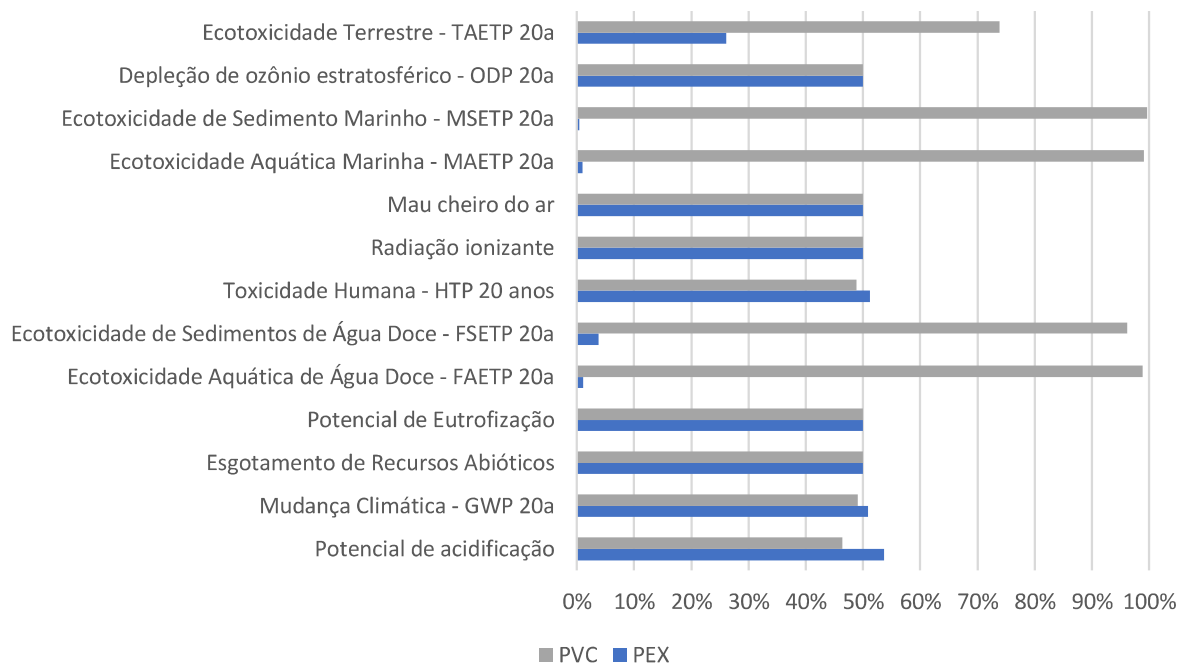
Apesar de não ser uma categoria de impacto contemplada na metodologia adotada para esse trabalho, é importante mencionar que a poluição sonora é um dos pontos negativos do transporte ferroviário, podendo gerar problemas socioambientais às comunidades que habitam as redondezas das linhas férreas.

4.3. Cenário III – Parnaíba/PI

O cenário representante da região nordeste é o local onde se obteve o maior equilíbrio entre as categorias de impacto para os tipos de tubulações. O PEX apresentou uma conduta ambiental mais poluente em 8 categorias, enquanto o PVC ficou à frente em 5, conforme mostrado na Figura 38, onde se tem um gráfico de barras 100% empilhadas mostrando a

porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto, e na Tabela 15.

Figura 38 - Resultado da ACV do cenário III.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 15 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário III.

Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	8
Impacto do PEX < Impacto do PVC	5

Fonte: Autoria própria (2023).

Apesar de estar à frente do PVC, o PEX apresentou resultados próximos aos do policloreto de vinila nas categorias de depleção da camada de ozônio estratosférico, mau cheiro do ar, radiação ionizante, toxicidade humana, potencial de eutrofização, esgotamento dos recursos abióticos, mudanças climáticas e potencial de acidificação. Essa situação mostra que se a distância de transporte dos tubos de polietileno reticulado for diminuída, o PEX poderia se tornar o material mais indicado para esse cenário.

O nordeste brasileiro é a segunda região com o maior número de fábricas de PVC identificadas, configuração que proporciona uma melhor distribuição do material pelos estados nordestinos, refletindo diretamente no percentual de liberação de emissões tóxicas no ciclo de vida desse produto, conforme observado na Figura 39, onde é possível identificar um menor grau de poluição proveniente do transporte para a logística de distribuição dos tubos de policloreto de vinila.

Figura 39 - Participação do transporte na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário III.



Fonte: Autoria própria (2023).

Apesar de contar com muitas fábricas de PVC no Nordeste, tem-se uma concentração de fabricantes nos estados de Pernambuco e Alagoas, principalmente nas cidades mais próximas ao litoral, essa situação desencadeia uma demanda de transporte maior para os municípios do interior. Dessa forma, uma alternativa para otimizar a distribuição dessa tubulação no Nordeste seria a criação de um Centro de Distribuição Avançado (CDA), estratégia que atende as necessidades de consumidores que se encontram distantes dos locais de produção de insumos.

Com um centro de distribuição a mercadoria que chega do fabricante é armazenada e, quando demandada, é direcionada aos locais de revenda e/ou utilização. Tendo em vista que do CDA a mercadoria pode ser destinada a diferentes destinos, a trajetória (e os índices de poluição) entre a fábrica e o centro de distribuição são compartilhados entre os consumidores finais, além de que serão necessárias menos viagens para a entrega da mercadoria.

Portanto, uma proposta seria a criação de um CDA em Juazeiro no Norte, conforme Figura 40. Essa cidade está localizada no estado do Ceará e possui boa infraestrutura viária de acessos aos litorais dos estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraíba e Alagoas e também apresenta proximidade com o interior dos estados nordestinos.

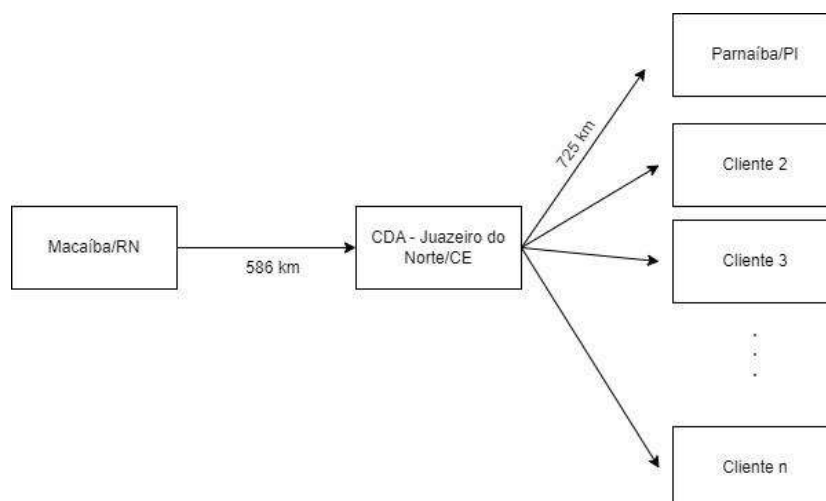
Figura 40 – Posicionamento do centro de distribuição na cidade de Juazeiro do Norte



Fonte: Autoria própria (2023).

A quilometragem total para a entrega do PVC ao cenário avaliado com a implementação do CDA seria a quilometragem do trecho entre a fábrica de Macaíba/RN até o local do centro de distribuição acrescido da distância até Parnaíba/PI, o que totaliza um percurso de 1311 km, como visto na Figura 41.

Figura 41 – Trajetórias com o CDA.



Fonte: Lacerda (2000).

Essa nova rota é superior à já avaliada e, por esse motivo, não traria melhorias ambientais ao ciclo de vida. Entretanto, sabendo que o percurso entre o local de fabricação e

Juazeiro do Norte é realizado apenas com uma vez, com uma carga consolidada, e que do CDA partem diversas cargas fracionadas para diferentes clientes, para a análise do ciclo de vida, pode-se considerar que as emissões advindas do percurso entre a fábrica e o CDA é proporcional ao número de clientes atendidos pelo centro de distribuição. Ou seja, os impactos do transporte da distância de 586km serão fragmentados de acordo com o número de consumidores abastecidos pelo centro de distribuição.

Nessa linha de pensamento, a proposta de criação de um CDA para a logística de distribuição de PVC no cenário III apresentaria melhorias ambientais desde que o número de clientes atendidos fosse igual ou superior a 3, conforme a Figura 42.

Figura 42 – Cálculo da distância percorrida com a implantação do CDA.

$$\begin{array}{ccccccc} 586 & / & 3 & + & 725 & = & 920,33 \text{ km} \\ \text{Distância entre a} & & \text{Número de clientes} & & \text{Distância entre o} & & \text{Distância total a ser} \\ \text{fábrica e o CDA} & & \text{atendidos} & & \text{CDA e o cliente} & & \text{considerada na} \\ & & & & & & \text{ACV} \\ & & & & & & \swarrow \\ & & & & & & \text{Menor que a} \\ & & & & & & \text{distância sem CDA} \end{array}$$

Fonte: Autoria própria (2023).

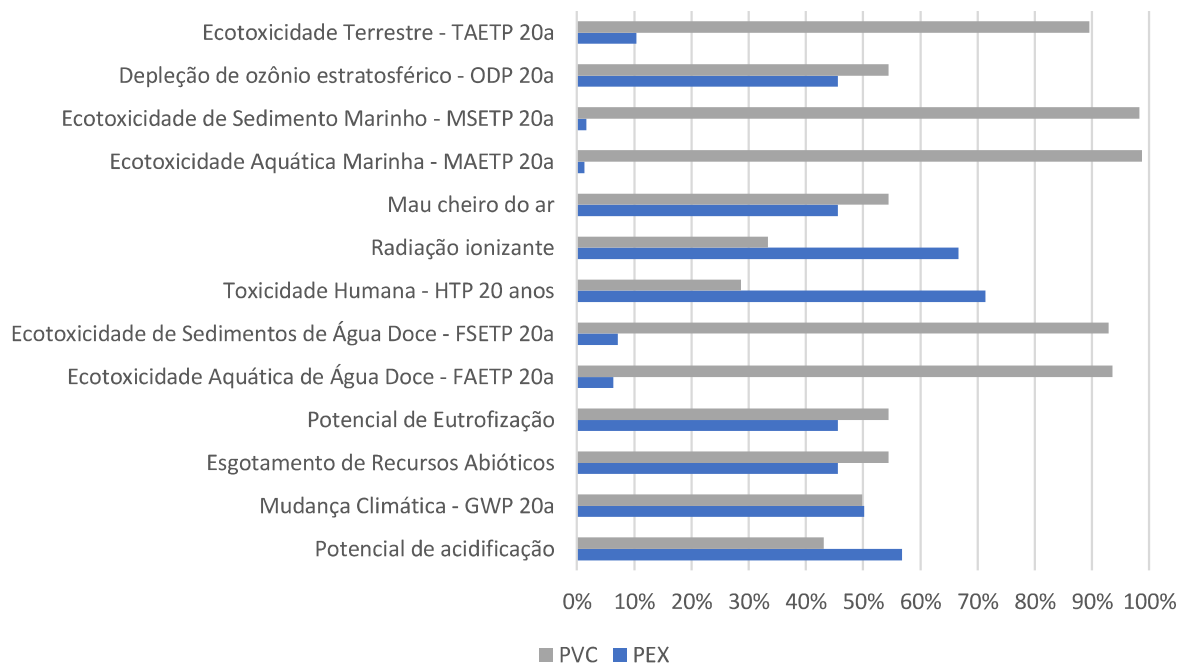
Com essa nova configuração da logística de distribuição do PVC, o transporte passa a representar um percentual de 27% de liberação de substâncias tóxicas ao meio ambiente, uma redução de 8 pontos percentuais de quando analisado sem o CDA, o que proporciona uma melhoria no comportamento ambiental do material e colabora com a sua competitividade, visto que a implementação de centros de distribuição permite um menor tempo de recebimento.

4.4. Cenário IV – Caxias do Sul/RS

O quarto cenário de estudo representa a região sul e está localizado no estado do Rio Grande do Sul. Para essa localidade a cidade dos fabricantes coincidiram para ambos os tubos, situação que gerou a distâncias de percurso semelhantes para os dois tipos de tubulação. Para a cidade de Caxias do Sul foi diagnosticado que o PEX é menos poluente que o PVC (4 categorias contra 9, respectivamente), conforme mostrado na Figura 43, onde se tem um gráfico de barras 100%

empilhadas mostrando a porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto, e Tabela 16.

Figura 43 - Resultado da ACV do cenário IV.



Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 16 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário IV.

Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	4
Impacto do PEX < Impacto do PVC	9

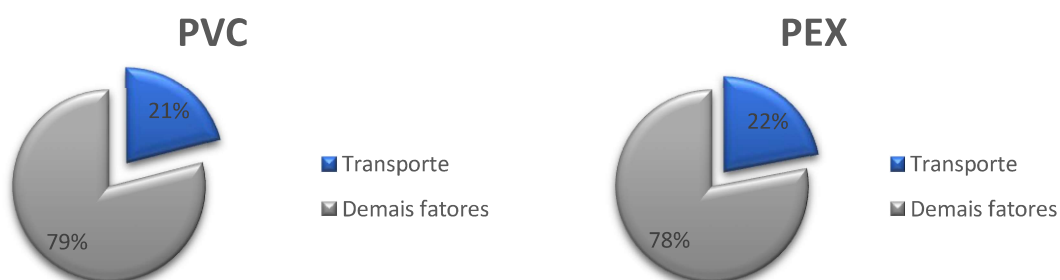
Fonte: Autoria própria (2023).

As categorias com maiores destaques negativos para o PVC foram as que afetam a hidrosfera. Essa realidade já é bastante conhecida e discutida no contexto mundial, onde se tem uma constante busca pela redução da poluição causada pelos plásticos em ambientes aquáticos. As substâncias oriundas do processo de fabricação são persistentes ao meio ambiente, resistindo

à degradação ambiental, e apresentam caráter bioacumulativos, penetrando nos tecidos dos seres vivos, e tóxicos à saúde dos ecossistemas aquáticos.

O transporte foi responsável pela liberação de 21% do CO₂ do ciclo de vida do PVC e 22% do PEX, de acordo com a Figura 44, apresentando um comportamento semelhante entre os dois tipos de tubulação para essa análise.

Figura 44 - Participação do transporte na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário IV.



Fonte: Autoria própria (2023).

Buscando minimizar essas emissões, para esse cenário será avaliado a alternativa da cabotagem, visto a existência e funcionamento do porto de São Francisco do Sul, situado a 53,20 km de Joinville/SC, e do porto de Porto Alegre/RS, localizado a 130 km de Caxias do Sul/RS. A trajetória percorrida está esquematizada na Figura 45. O porto de São Francisco do Sul é um terminal público que já atingiu um total de 13 milhões de toneladas movimentadas, sendo uma das principais rotas de escoamento do estado de Santa Catarina (SCPA, 2023). Enquanto que o porto de Porto Alegre, juntamente com os complexos marítimos privados do Rio Grande do Sul, transporta cerca de 6 milhões de toneladas de cargas (PORTOS RS, 2023).

Figura 45 – Trajetória do transporte por cabotagem.



Fonte: Autoria própria (2023).

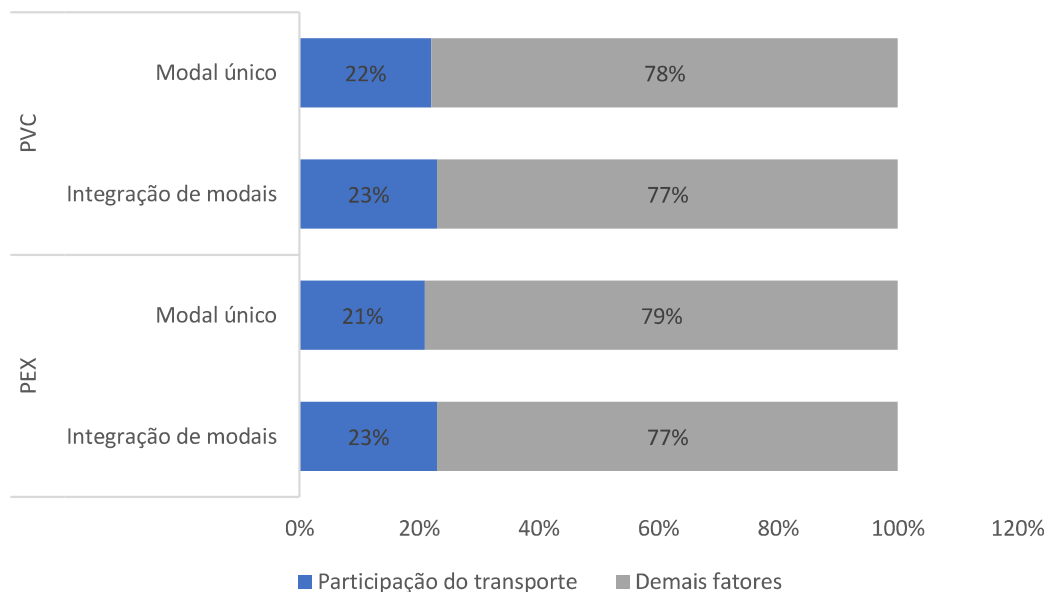
Essa proposta de logística de distribuição é composta por etapas de transporte de cabotagem, compreendido na trajetória entre os portos, e transporte rodoviário, referente ao percurso da cidade até o terminal portuário e vice-versa. A Tabela 17 resume as distâncias percorridas por cada modalidade e a Figura 46 mostra o comparativo entre a sugestão proposta e a modelo inicial para este cenário.

Tabela 17 – Distâncias por modalidade de transporte.

Modalidade de transporte	Distância percorrida (km)
Rodoviário	183,20
Cabotagem	1102,00

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 46 – Comparação do percentual de emissão de CO₂.



Fonte: Autoria própria (2023).

Essa forma de transportar as tubulações resultou em um acréscimo do percentual de CO₂ emitido para a situação já analisada, mostrando que a logística de distribuição, para esse caso, é mais eficiente ambientalmente quando realizada apenas pelo transporte rodoviário. Tal resultado pode ser explicado visto que a quilometragem percorrida pela alternativa de transporte por cabotagem é superior à opção de somente transporte rodoviário, o que maximiza a emissão de poluentes na atmosfera.

Contudo, é importante pontuar que a análise da cabotagem foi feita apenas para a fronteira de estudo definida neste trabalho, a fim de equalizar os percentuais de poluição. Em situações reais de movimentação de grandes cargas a cabotagem se mostra como um modal de transporte menos poluente, que colabora com a melhoria da qualidade do ar e a com a eficiência energética, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis.

4.5. Cenário V – Osasco/SP

O último cenário avaliado foi a cidade de Osasco/SP, localidade onde se obteve as menores distâncias de transporte. Esse estudo resultou no PVC mais poluente em 12 categorias de impacto, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Comparativo entre a quantidade de categorias de impacto ambiental para o cenário V.

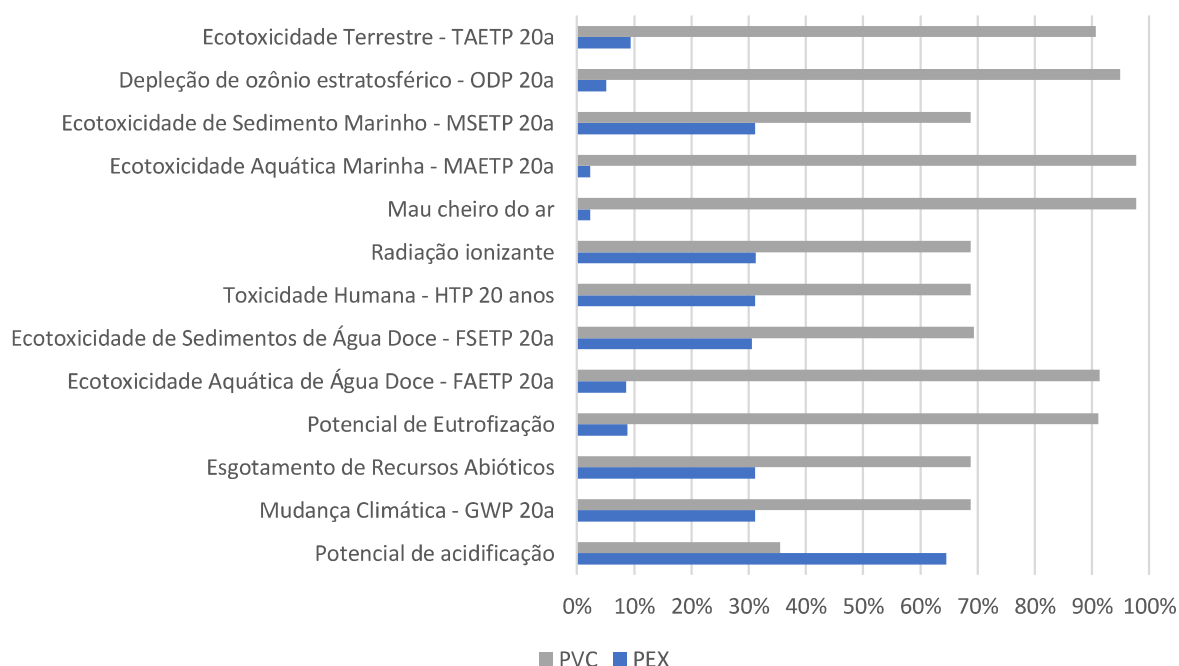
Verificação	Quantidade de categorias
Impacto do PEX > Impacto do PVC	1
Impacto do PEX < Impacto do PVC	12

Fonte: Aatoria própria (2023).

Essa realidade é a mesma observada na ACV que desconsidera o transporte. Tal comportamento é explicado tendo em vista que trajetória do PEX é mais curta que a do PVC, situação que caracteriza as tubulações em policloreto de vinila, nas circunstâncias definidas nesse estudo, ser tida como menos contaminante que as de polietileno reticulado.

A única categoria de impacto que o PEX se comportou acima do PVC foi a de radiação ionizante, como observado na Figura 47, onde se tem um gráfico de barras 100% empilhadas mostrando a porcentagem de poluição que as tubulações geram para o total de cada categoria de impacto. Esse quesito mede a quantidade de anos de vida saudável perdidos por conta de atividades na cadeia de produção de insumos e serviços. Em se tratando de tubulações de polietileno reticulado, a radiação ionizante é proveniente, principalmente, da modificação dos materiais poliméricos, processo realizado para a obtenção da resina PEAD.

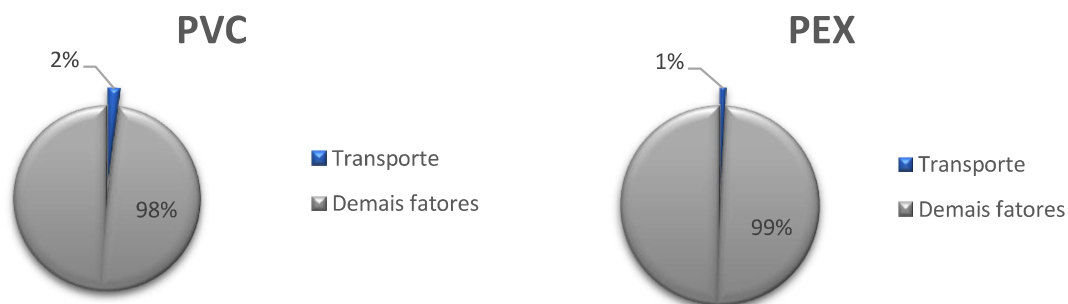
Figura 47 - Resultado da ACV do cenário V.



Fonte: Aatoria própria (2023).

Por conter as menores trajetórias de logística de distribuição, o cenário V apresenta as menores taxas de poluição advindas do processo de transporte, de acordo com a Figura 48.

Figura 48 - Participação do transporte na liberação de CO₂ nos ciclos de vida para o Cenário V.



Fonte: Autoria própria (2023).

As menores trajetórias entre fábrica e cidade fez com que se obtivesse as mais baixas influências do transporte no ciclo de vida, tanto para o PVC (2%) quanto para o PEX (1%). Esse local de estudo está situado no estado de São Paulo, a unidade federativa com as melhores rodovias do país e interligada por diversos acessos aos outros estados brasileiros. Portanto, para este cenário, caso o transporte fosse desconsiderado das análises, não seria identificado diferenças relevantes no resultado ACV.

Ainda, sendo a cidade Osasco/SP, dentre os cenários avaliados, a que possui o melhor posicionamento em relação às fábricas existentes, a escolha do tipo de material mais recomendado, sob a ótica da sustentabilidade, de acordo com os parâmetros adotados nesse trabalho, não será influenciada pela logística de distribuição, tendo em vista a pouca participação do transporte na ACV das tubulações.

4.6. Resumo das análises

A Tabela 19 resume os resultados para cada cenário de estudo e apresenta um comparativo entre as distâncias de transporte.

Tabela 19 - Relação entre as distâncias e resultados para cada cenário.

	Proporcionalidade entre as distâncias	Comparativo entre as distâncias	Resultado obtido na ACV
I	$Dist_{PVC} \cong 0,956 \times Dist_{PEX}$	$Dist_{PVC} < Dist_{PEX}$	PVC mais poluente (10 categorias)
II	$Dist_{PVC} \cong 0,700 \times Dist_{PEX}$	$Dist_{PVC} \ll Dist_{PEX}$	PEX mais poluente (9 categorias)
III	$Dist_{PVC} \cong 0,763 \times Dist_{PEX}$	$Dist_{PVC} \ll Dist_{PEX}$	PEX mais poluente (8 categorias)
IV	$Dist_{PVC} \cong 0,938 \times Dist_{PEX}$	$Dist_{PVC} < Dist_{PEX}$	PVC mais poluente (9 categorias)
V	$Dist_{PVC} \cong 2,369 \times Dist_{PEX}$	$Dist_{PVC} > Dist_{PEX}$	PVC mais poluente (12 categorias)

Fonte: Autoria própria (2023).

É possível diagnosticar um padrão no comportamento dos resultados obtidos. Para os cenários onde se tem uma distância de transporte semelhante para ambos os tipos de tubulação, como é o caso de I e IV, o PVC se apresenta maior quantidade de poluição nas categorias de impacto, aproximando-se da modelagem em que o transporte não é levado em consideração. Já nos cenários onde as trajetórias do PEX são muito superiores às do policloreto de vinila, situações II e III, o polietileno reticulado tem uma taxa de poluição superior nas categorias de impacto.

Observou-se que o PEX, nas circunstâncias aqui analisadas, mantém uma conduta ambiental mais ecológica nos casos onde as distâncias de transporte para a logística de distribuição são menores ou semelhantes às do PVC e este, por sua vez, só é menos poluente quando sua trajetória de locomoção se mostrou 76% inferior à do PEX.

O transporte se mostrou mais influente nos ciclos de vida dos cenários I e III, cidades das regiões norte e nordeste, territórios historicamente prejudicados com investimentos em infraestrutura. A maior participação do transporte foi no ciclo de vida do PEX na cidade de Parauapebas/PA, onde 76% do CO₂ da fronteira estudada é oriundo do processo de deslocamento da fábrica até o local de utilização.

A região centro-oeste, exemplificada no cenário II, não possui fábricas de nenhum tipo de tubulação, contudo, se mostrou como o segundo cenário em que os efeitos do transporte menos aparecem no ciclo de vida dos tubos, fato que pode ser justificado pela localização centralizada e da proximidade com o DF, situações que fazem dessa região uma zona estratégica que abre conexões com todas as outras partes do país.

O sudeste brasileiro, representado pelo cenário V, foi a região onde menos foi observado a participação do transporte nas emissões de poluentes na atmosfera, resultado muito vinculado

às condições de desenvolvimento econômico, estado de São Paulo possui o maior PIB nacional, e de infraestrutura do local, a malha viária paulista é a mais extensa do Brasil.

Cabe pontuar que na região nordeste foram identificadas fábricas de ambos os materiais, contudo, mesmo assim, as distâncias percorridas até o cenário dessa localidade (III) se mostraram altas, situação que corrobora com as condições deficientes da infraestrutura de transporte no nordeste brasileiro.

Os tubos PEX tem uma maior dependência do transporte que os de PVC, tendo em vista que, com exceção do cenário V, em todos os outros locais ele teve uma participação do transporte superior ao policloreto de vinila. Tal diagnóstico pode ser justificado tendo em vista a baixa quantidade de fábricas existentes no Brasil, situação que exige uma grande movimentação desse material para chegar a outras localidades e atender a demanda exigida. A maior disseminação das tubulações em PVC no Brasil pode estar relacionada com o seu menor custo de instalação, composto por uma mão de obra barata, acessível e abundante, cenário apostado quando se trata dos tubos de PEX.

Os estudos de Taborianski e Prado (2012), Nabut Neto (2011), Palácio (2013) e Gong *et al.* (2012) também abordaram os efeitos do transporte na ACV de materiais da construção civil, contudo, o local das suas avaliações são regiões desenvolvidas (Distrito Federal/Brasil, São Paulo/Brasil e Pequim/China) ou com proximidade a locais com uma infraestrutura de transporte melhor disseminada, o que ocasionou uma menor participação do transporte na ACV, semelhante aos resultados encontrado nos cenários II, região centro-oeste, e IV, região sul. Já Caldas e Sposto (2017), em suas análises da logística de entrega de blocos de concreto no norte do Brasil, encontraram um percentual por volta de 70% da participação do transporte, análogo ao identificado no cenário I para a mesma região.

Dessa forma, vê-se que o transporte pode ter influência considerável no ciclo de vida de produtos, principalmente quando se leva em consideração as dimensões continentais do Brasil, as desigualdades industriais, tecnológicas e de infraestrutura entre uma região e outra, evidenciando a importância de adicionar os efeitos do transporte em estudos ambientais.

É importante mencionar que essa análise engloba somente as fábricas de PVC aprovadas no PSQ e as de PEX vinculadas à ABIPLAST. É comum, principalmente no Brasil, empresas de materiais renunciarem aos programas governamentais e entidades reguladoras que garantem a qualidade dos materiais produzidos conforme estipulado pelas normativas vigentes.

5. CONCLUSÕES

Para os parâmetros e limites adotados nessa pesquisa foi possível diagnosticar que o transporte apresenta uma participação efetiva e considerável na emissão de CO₂, principalmente para os cenários situados no norte e nordeste brasileiro, sendo apenas a região sudeste com índices de emissões desprezíveis. Esse resultado ratifica a ideia de que em países com dimensões continentais, como o Brasil, o quesito transporte, na avaliação do ciclo de vida de materiais e, especialmente, tubulações de PVC e PEX, pode ser responsável por altos índices de poluição, propiciando resultados distantes da realidade para análises em que esse fator é desconsiderado.

Enxergado que o transporte tem uma parcela de influência no comportamento ambiental desses materiais, a escolha da tubulação com a melhor eficiência ambiental dependerá da localização geográfica em que o sistema predial será executado, analisando a existência de fábricas próximas ao local da obra e as condições de infraestrutura para o deslocamento de mercadorias.

Apesar desse estudo não levar em consideração a qualidade das vias, foi diagnosticado que a infraestrutura rodoviária está diretamente vinculada com o índice de partículas tóxicas liberadas no meio ambiente, visto que os maiores percentuais de poluição foram identificados nas regiões com as piores rodovias, situação muito influenciada pela falta de acessos e caminhos, conjuntura que proporciona maiores trajetórias entre origem e destino de carregamentos.

Dos fatores que garantem a sustentabilidade de um material (custo, impacto ambiental e impacto social), esse estudo está focado apenas nas questões ambientais. Recomenda-se que a escolha definitiva de qual tubulação utilizar seja também amparada por análises financeiras e sociais.

Verificou-se que o PEX é o material que influencia menores quantidades de categorias de impacto quando se tem distâncias de transporte próximas ou pouco superiores às do PVC, podendo definir que quando o PVC possui uma logística de distribuição inferior à do PEX em uma escala de 0,76, a ACV apontará o policloreto de vinila como material menos poluente que o polietileno reticulado.

Contudo, o polietileno reticulado, por demandar mais necessidade de transporte, tendo em vista o baixo número de fábricas pelo país, libera mais CO₂ que o policloreto de vinila.

Dessa forma, a construção de mais fábricas de PEX em território brasileiro e, conseqüentemente, a diminuição das trajetórias desse material colaboraria com a redução de partículas tóxicas na atmosfera, tendo em vista que o principal quesito que torna o PEX mais poluidor que o PVC é a logística de distribuição.

Essa pesquisa beneficia a indústria da construção civil e a sociedade construtiva no monitoramento de suas emissões poluentes e auxilia na definição de estratégias de controle de poluição e, principalmente, na liberação de CO₂. Ainda, essa análise se mostra como pioneira na disciplina de sistemas prediais brasileiros, servindo como fomento na formação de profissionais preocupados em melhorar o comportamento da construção civil com o meio ambiente.

Sendo o Brasil um país com uma matriz de transporte desequilibrada, a busca pela integração e a intermodalidade dos meios de transporte é uma ferramenta que colabora com a melhoria da conduta ambiental da etapa de logística de distribuição de materiais e insumos, otimizando o consumo energético e oferecendo benefícios para a saúde pública e a mobilidade urbana.

Ainda, estudos com essa vertente colaboram com empreendimentos que desejam adquirir certificações de construções sustentáveis, como o *Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)* e Alta Qualidade Ambiental (AQUA), tendo em vista que esses programas possuem em seu escopo pontuações para a escolha de materiais locais, dentro de uma quilometragem máxima entre o canteiro de obras e a fábrica, colaborando com uma menor emissão de CO₂ na atmosfera.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de estudos com mais cenários de amostragem, englobando questões como as condições das rodovias e dos caminhões, ampliar a fronteira da ACV, adicionando outras etapas do ciclo de vida das tubulações, para assim obter resultados mais precisos quando a participação do transporte na emissão de gases do efeito estufa, propor novas alternativas para a redução das emissões provenientes do transporte no ciclo de vida dos materiais, realizar a modelagem da ACV em outros softwares e utilizando outras bases de dados para comparar os resultados obtidos aqui e englobar os quesitos social e econômico na análise das tubulações para determinar com total respaldo sustentável o tipo de tubo mais recomendado para cada região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADMINISTRAÇÃO DAS HIDROVIAS DA AMAZÔNIA OCIDENTAL (AHIMOC). **Transportes na Amazônia**. BNDES. 2018.

ALSADI, A.; MATTHEWS, M.; MATTHEWS, E. Environmental Impact Assessment of the Fabrication of Pipe Rehabilitation Materials. **J. Pipeline Syst. Eng. Pract.** 2020. DOI 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000395.

ASADI, S.; BABAIZADEH, H.; FOSTER, N.; BROUN, R. Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, pp. 1228-1236, nov. 2016.

ALVARENGA, A. C.; ROCHA, H. R.; PORTELA JÚNIOR, E. A.; CONCEIÇÃO, M. Viabilidade de utilização de tubulações PEX em instalações prediais de gás: Um estudo comparativo com tubulações de cobre e ferro galvanizado. **Revista Universo**. Niterói. Rio de Janeiro. 2018

ALVARENGA, H. **Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos**. ILOS, 2020. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/matriz-de-transportes-do-brasil-a-esperados-investimentos/>. Acesso em: 08 de janeiro de 2023.

AMANCO. **Linha Amanco PEX**. Manual Técnico. 2016. Disponível em: <http://assets.production.amanco.com.br.s3.amazonaws.com/uploads/collapse/file/49/Manual-PEX-2015-WEB-FINAL.pdf>. Acesso em: 03 de maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil**. 2022. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wpcontent/uploads/2022/05/Preview_ABIPLAST_2021_web.pdf. Acesso em: 21 de jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CICLO DE VIDA (ABCV). **Eventos**. Disponível em: <http://abcvbrasil.org.br/eventos.php>. Acesso em: 15 de março de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edificações habitacional - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

_____. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TUBOS POLIOLEFÍNICOS E SISTEMAS (ABPE). **Manual de boas práticas**. Módulo 4. Procedimentos de estocagem e manuseio. Disponível em: http://www.abpebrasil.com.br/cartilha/4_1.pdf Acesso em: 06 de jul. 2022.

ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. Rio de Janeiro, PNUD, IPEA, Fundação João Pinheiro, 2023.

BARROS, A.J.S.; LEHFELD, N.A.S **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007, 257p.

BATISTA, C. S. **Estudo Comparativo de Sistemas Prediais de Distribuição de Água Utilizando PX e PVC**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. Goiás. 2017. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO_COMPARATIVO_DE_SISTEMAS_PREDIAIS_DE_DISTRIBUI%C3%87%C3%83O_DE_%C3%81G_UA_UTILIZANDO_PEX_E_PVC_.pdf. Acesso em: 09 de jun. 2022.

BRASIL. Ministério das Cidades. Programa Setorial da Qualidade. **PSQ de tubos e conexões 2022**. Disponível em: < <https://pbqp-h.mdr.gov.br/psq/tubos-e-conexoes-de-pvc-para-sistemas-hidraulicos-prediais/>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Transporte Rodoviário de Cargas**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20\[PT\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20[PT].pdf). Acessado em outubro de 2022.

BRASKEN. **Relatório Integrado 2021**. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/portal/Principal/arquivos/Braskem-Relatorio-Integrado-2021-PORT-16-06.pdf> Acesso em: 13 jun. de 2022.

BRE. **Building Research Establishment. Global Product Category Rules for Type III: environmental product declarations os construction products to EN 15804:2012**. Reino Unido. 2012. Disponível em: <https://www.bre.co.uk/filelibrary/Materials/BRE-EN-15804-PCR-PN514.rev-0.1.pdf> Acesso em: 14 mar. 2022.

BYRNE, D. M. *et al.* Environmental assessment of urban water systems: LCA case studies. **Assessing Progress Towards Sustainability**. pp. 327-345. Ed. Elsevier, 2022.

CABEZA, L. F. *et al.* Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of Buildings and the Building Sector: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, pp. 394-416, 2014.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4.

CALLISTER, W D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2 ed. 2002.

CARVALHO, C. H. R. **MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: CONCEITOS, TENDÊNCIAS E REFLEXÕES**. Instituto de pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro. 2016.

CARVALHO, F. S. G. **Extrusão a quente de tubos: análise experimental da distribuição de tensões residuais na parede do tubo**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. 2013.

CARVALHO, J. M. M. **Otimização de processos produtivos de extrusão**. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2019.

CHEHEBE, J. R. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, CNI, 2002. 120 p.

CLARCKE, A.; GRANT, N.; THORNTON, J. Quantifying the energy and carbon effects of water saving: full technical report. **Environment Agency**. Great Britain, 2009.

CNT E SEST SENAT. Pesquisa CNT de rodovias 2022. Brasília, Brasil, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Estudos e Pesquisas**. Brasília. 2022.

COLEHO FILHO, O.; SACCARO JUNIOR, N. L.; LUEDEMANN, G.; **A Avaliação de Ciclo de Vida como Ferramenta para a Formulação de Políticas Públicas no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf. Acessado em: novembro de 2022.

COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: Cetea/Ital, 2007. 75 p.

COMODI, G. *et al.* LCA Analysis of Renewable Domestic Hot Water Systems with Unglazed and Glazed Solar Thermal Panels. **Energy Procedia**. V. 61, pp. 234-237. 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Editorial. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/0e8733db-0f86-47c2-856b-f296b1a8573f.pdf>. Acessado em agosto de 2022.

CONNELL, M., STENSON, A., WHELTON, A. From Mouth to Main: Plastic Plumbing Pipe Choices for Green Buildings and New Construction. **Pipeline**. AL/MS AWWA Section Newsletter, Jackson, Mississippi, USA. 2014.

CORRÊA, C. S. **Aspectos econômicos e hidráulicos da utilização do PEX como alternativa em projetos de instalações hidráulicas prediais.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.

COUGHLAN, J.J.; HUG, D.P. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*.v. 6, p.490-494. **John Wiley & Sons.** New York. 1986.

COUTO, Y. A. E. **ESTUDO DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE KITS HIDROSANITÁRIOS EM OBRAS DE EDIFICAÇÕES.** 2014. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11906/1/monopoli100092_72.pdf Acesso em 23 de Junho de 2022.

CURRAN, M. A. Report on Activity of Task Force 1 in the Life Cycle Inventory Programme: Data Registry – Global Life Cycle Inventory Data Resources. **International Journal Life Cycle Assessment.** v. 11, nº 4, p. 284 – 289. 2006.

CURTINHAS, A. *et al.* **Projeto de instalações de água fria utilizando PEX.** Centro Universitário UNI-FAT, Atibaia, SP, Brasil, 2018. Disponível em: <http://186.251.225.226:8080/bitstream/handle/123456789/143/Curtinhas%2c%20Andr%c3%a9%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 03 de jun. 2022.

ECVM. **The European Council of Vinyl Manufacturers.** Bruxelas. Bélgica. 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Transporte Rodoviário de Cargas. 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20\[PT\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20[PT].pdf). Acesso em: dezembro de 2021.

ENSLOW, T. **Comments of Coalition for Safe Building Materials on the Recirculated Draft Environmental Impact Report on the Adoption of Statewide Regulations Allowing the Use of PEX Tubing.** Letter to Valerie Namba. California Department of General Services. 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Life cycle assessment: principles and practice.** Ohio, 2006.

EU. RANDA - 004: AEA in collaboration with Metroeconomica. Economic evaluation of PVC waste management. European Commission Environment Directorate. 2000.

FARIAS, E. A. **Dimensionamento e otimização de sistemas hidráulicos prediais de água fria.** Universidade Estadual da Paraíba. Paraíba. 2017.

FIORI, S. *et al.* Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* v. 19, pp. 186-197. 2014.

FRANKLIN ASSOCIATES. **Cradle-to-Gate Life Cycle Inventory of Nine Plastic Resins and Four Polyurethane Precursors**. Franklin Associates. Kansas, United States, 2011.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). **Experiências e reflexões sobre a gestão do ciclo de vida de produtos nas empresas brasileiras: Ciclos 2015 e 2016**. Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces), São Paulo, 2017.

GAMARRA, A. R. *et al.* Energy and water consumption and carbon footprint of school buildings in hot climate conditions. Results from life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**. V. 195, pp. 1326-1337. 2018.

GODINHO, M. M. V. *et al.* Impacto da Distância e Tipo de Transporte de Materiais nas Emissões de CO₂ na Construção de um Empreendimento Habitacional de Interesse Social. **LATIN-AMERICAN AND EUROPEAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS AND COMMUNITIES**. 28. Lisboa, 2015.

GONG, X. *et al.* Life Cycle Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission of Residential Building Designs in Beijing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 4, pp. 576-587, 2012.

GOOGLE MAPS. 2022. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 12 ago. 2022.

GOUVEIA, R. B. **ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE PVC, PEX E PPR EM EMPREENDIMENTOS MULTIFAMILIARES**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

HAMOUDA, H. B. H; SIMOES-BETBEDER, M.; GRILLON, F.; BLOUET, P.; BILLON N.; PIQUES, R. Creep damage mechanisms in polyethylene gas pipes. **Polymer**. V 42, Issue 12. Pages 5425-5437. ISSN 0032-3861. 2001 [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00490-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00490-0).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. ESTIMATIVAS POPULACIONAIS (IBGE). Rio de Janeiro. 2022.

_____. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.;

_____. **Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 01 de jun. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC (IBPVC). **Estatísticas**. Disponível em: <https://pvc.org.br/> Acesso em: 16 de jun. de 2022.

IKP. CH-16: BUWAL. Ökoinventare für Verpackungen, Volume 1. Berlim. Alemanha. 1996

IKP. NL-3: Environmental profile and environmental measures of a concrete external sewer. Intron Report No. 95027. 2003.

INSTITUTO MAURO BORGES DE ESTATÍSTICAS E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS (IMB). **Goiás em Dados 2022**. Disponível em:

<https://www.imb.go.gov.br/files/docs/publicacoes/goias-em-dados/godados2022.pdf>. Acesso em: janeiro de 2023.

IPU. ENTEC UK. Limited. Life cycle assessment of Polyvinyl Chloride and Alternatives: Summary report for consultation. Department of Environment. **Transport and the Regions**. London Ecobalance. UK, 2000.

JEONG, H. *et al.* Life cycle assessment of small-scale greywater reclamation systems combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia. **Journal of Cleaner Production**. V. 174, pp. 333-342. 2018.

JIMÉNEZ-GONZÁLEZ, C., KIM, S.; OVERCASH, M.R. Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information. **J. LCA**. V. 5, 153–159. 2000.

<https://doi.org/10.1007/BF02978615>

JÖNBRINK, A. K.; WOLF-WATZ, C.; ERIXON, M.; OLSSON, P.; WALLÈN, E. LCA **Software Survey**. IVL Svenska Miljöinstitutet. B report ; B1390. Estocolmo, Suécia. 2000.

KALAKUL, S.; MALAKUL, P.; SIEMANOND, K; GANI, R. Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. **Journal of Cleaner Production**. V. 9. p. 1-12. 2014.

KARINOSKI, A. K.; GHISI, E. Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings. **Resources, Conservation and Recycling**. V. 14, pp. 100-114. 2019.

KELLEY, K. *et al.* Release of drinking water contaminants and odor impacts caused by green building cross-linked polyethylene (PEX) plumbing systems. **Water Research**. v. 67. p. 19-32. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.051>

KOTAJI, S.; SCHUURMANS, A.; EDWARDS, S. Life-cycle assessment in building and construction: a state-of-the-art report. Pensacola. FL, **Society of Environmental Toxicology and Chemistry**. 2003

LACERDA, L. Armazenagem e localização de novas instalações. IN: FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. **Logística empresarial: a perspectiva brasileira**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2000. cap. 5, p. 153-176.

LEVASSEUR, A. *et al.* Greenhouse gas emissions and climate change impacts. Programme. United Nations Environment. **Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators**. Volume 1. 2016. p. 58-75.

LOBO, F. H. R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba, 2010.

MAESELE, C.; ROUX, P. An LCA framework to assess environmental efficiency of water reuse: Application to contrasted locations for wastewater reuse in agriculture. **Journal of Cleaner Production.** V. 316, 2021.

MAIA JUNIOR, J. V. F. **Comparação de métodos de dimensionamento em redes de distribuição de água.** 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental). Centro de Tecnologia. Universidade federal do Ceará. 2012.

MARGUGLIA, A.; BENETTO, E.; RIOS, G.; RUGANI, B. SCALE. Software for Calculating Energy based on life cycle inventories. **Ecological Modelling.** v. 248, p. 80– 91. 2013.

MARSON, A.; MANZARDO, A.; PIRON, M.; FEDELE, A.; SCIPIONI, A. Life cycle assessment of PVC - A polymer alloy pipes for the impacts reduction in the construction sector. **Chemical Engineering Transactions,** v. 86, pp. 721-726, jun. 2021.

MONTEIRO, H.; FREIRE, F.; SOARES, N. Life cycle assessment of a south European house addressing building design options for orientation, window sizing and building shape. **Journal of Building Engineering,** v. 39, jul. 2021.

MOURAD, A. L. *et al.* **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão.** Leda Coltro (Org.). Campinas: CETEA/ITAL, 2007. ISBN 978-85-7029-083-0

MUELLER, W.; JAKOB, I. Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. **Polymer Degradation and Stability.** Volume 79. Issue 1, 2003, Pages 161-172, ISSN 0141-3910. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00269-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00269-0).

NABUT NETO, A.C. **Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas: estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília,** Tese de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2011.

PÁDUA, Z. M. C. P. **AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ POR VEÍCULOS DE TRANSPORTE DE CARGA PELO MÉTODO BOTTON-UP EM RODOVIAS COM PISTA DUPLA E SIMPLES.** Dissertação (Mestrado)- Centro Universitário de Araraquara Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente. Araraquara: Centro Universitário de Araraquara, 2014.

PALÁCIO, C. D. U. **Energia Incorporada de Vedações Para Habitação de Interesse Social Considerando-se o Desempenho Térmico: estudo de caso com utilização do Light**

Steel Frame no Entorno do DF, Tese de M. Sc. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2013.

PARVEZ, J. Life cycle assessment of PVC water and sewer pipe and comparative sustainability analysis of pipe materials. In: **91st Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference**, Nova Orleans, Louisiana, EUA, out. 2018.

PENNAFORT JÚNIOR, L. C.G.; SILVA, F. R.; DEUS, E. P. Avaliação e caracterização de tubos fabricados com PVC reciclado. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. São Carlos-SP, v. 23, n. 4, p. 547-551. 2013.

PÉREZ, J.; LUMBRERAS, J.; RODRÍGUEZ, E. Life cycle assessment as a decision-making tool for the design of urban solid waste pre-collection and collection/transport systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, 2020.

PIEKARSKI, C. M. **Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em avaliação do ciclo de vida e indicadores corporativos**. 2015. 146 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL (SCPAR). Dados Gerais. 2023. Disponível em: <https://portosaofrancisco.com.br/dados-gerais/>. Acesso em: dez. 2022.

PORTO RS. Conheça o porto. 2023. Disponível em: https://www.portosrs.com.br/site/comunidade_portuaria/porto_alegre/conheca_o_porto. Acesso em: jan. 2022.

QUDDUS, T., *et al.* Retrofit of Building Façade Using Precast Sandwich Panel: An Integrated Thermal and Environmental Assessment on BIM-Based LCA, **Buildings**, v. 12, 2098, 2022.

QUINTEIRO, P., *et al.* Life cycle assessment of ceramic roof tiles: A temporal perspective, **Journal of Cleaner Production**, v. 363, ago. 2022.

RALUY, R. G.; DIAS, A. C. Domestic hot water systems: Environmental performance from a life cycle assessment perspective. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, pp. 1011-1020. 2021

RAMIREZ, P. **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida**. 138p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Santa Catarina. 2009.

ROCHA, D. P. B. **Avaliação do ciclo de vida de agregados leves artificiais produzidos com resíduo industrial e argila vermelha local (Nordeste/Brasil)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

RODOLFO JUNIOR, A.; MEI, L. H. I. Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC. **Polímeros: ciência e tecnologia**. vol. 17, n.3, p. 263-275, 2007.
<https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300018>

RODOLFO JUNIOR, A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. Braskem, São Paulo. 2 ed. 2006.

RODRIGUES, C.R.B.; ZOLDAN, M.A.; LEITE, M.L.G.; OLIVEIRA, I.L. **Sistemas Computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV)**. Enegep. Rio de Janeiro, 2008.

ROSSELLÓ, B. *et al.* CO₂ emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands. **Energy and Buildings**. 42. 547-558. 2010.
10.1016/j.enbuild.2009.10.024.

RUIZ-PADILLO, A.; SILVEIRA, A. A.; TORRES, T. B. **Sistemas de transporte**. Lamot. Universidade Federal de Santa Maria. Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2020.

SARABIA-ESCRIVA, E. *et al.* Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes. **Energy and Buildings**. v. 286. 2023.

SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION (SAIC). Life cycle assessment: principles and practice. Cincinnati. National Risk Management Research Laboratory. **Office of Research and Development**. US Environmental Protection Agency. 2006.

SFEIR, T. A. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE PELLETS DE MADEIRA UTILIZANDO O SOFTWARE LIVRE OPENLCA**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013.

SILVA, A. L. N. **Preparação e Avaliação de Propriedades Térmicas, Morfológicas, Mecânicas e Reológicas de Misturas à Base de Polipropileno e Poli(etileno-co-1-octeno)**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. 1999.

SILVA, D. O. F. **Reaproveitamento de lamas residuais na fabricação do concreto**. Tese (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3153/tde-24062016-152439/publico/DanielOliveiraFrazaoSilvaPPGICCcorr2015.pdf> Acesso em: 13 de maio de 2022.

SILVA, E. R. **Caracterização da área de proteção ambiental do delta do rio Parnaíba através de geotecnologias**. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Economia Ecológica, Fortaleza, 2020.

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

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F. P. A pesquisa científica. In: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. cap. 02, p. 31-42.

SIMÃO, L. E., SCARIOT, G. L., CEZNE, M. A. Transporte rodoviário de cargas: Como selecionar um método para cálculo de emissão de CO₂ da sua frota? **Estratégia & Negócios**, v. 15, pp. 97-122, 2022.

SOUZA, C. C. **Aspectos econômicos e hidráulicos da utilização do PEX como alternativa em projetos de instalações hidráulicas prediais**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2012. 108, out./dez. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO₂ Emission in the Life Cycle of Office Building Façades. **Environmental Impact Assessment Review**. v. 33, p. 41-47, 2012.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de Edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PPGEC. Curso de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006.

TEIXEIRA, J. B. G.; LINDENMAYER, Z. G. **Serra dos Carajás**. Geologia do Brasil. Capítulo 10. Beca. p.176-182.

UGAYA, C. M. L.; ALMEIDA NETO, J. A.; FIGUEIREDO, M. C. B. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida. IBICT, 2019. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/07/Relat%C3%B3rio-de-Recomenda%C3%A7%C3%B5es-de-Modelos-de-Avalia%C3%A7%C3%A3o-de-Impacto-para-o-Contexto-Brasileiro.pdf>. Acesso em: setembro de 2022.

UNAL, A. *et al.* Quantification of Highway Vehicle Emissions Hot Spots Based upon On-Board Measurements. **Journal of the Air & Waste Management Association**. 2004.

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. LCA Resources. Disponível em: <https://www.epa.gov/> Acesso em: mar. 2022.

VAHID, E., *et al.*, Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems, *Sustainable Cities and Society*, v. 27, pp. 167-174, nov. 2016.

VALT, R. B. G. **Ciclo de vida de embalagens para bebidas no Brasil**. Brasília: Thesaurus, 2007. 224 p.

VLI LOGÍSTICA. Regulação e documentos. Disponível em: <https://www.vli-logistica.com.br/quem-somos/regulacao-e-documentos/>. Acesso em: jan. 2023.

XIONG, J.; ZHU, J.; HE, Y.; REN, S.; HUANG, W.; LU, F. The application of life cycle assessment for the optimization of pipe materials of building water supply and drainage system. **Sustainable Cities and Society**, v. 60, art. no. 102267, 2020.

ZANGHELINI, G. M.; DE SOUZA JUNIOR, H. R. A.; CHERUBINI, E.; KULAY, L. A.; SOARES, S. R. **Análise da evolução dos temas de pesquisa da ACV no Brasil baseada na relação de co-words**. LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, [S. l.], v. 1, n. 2 esp., p. 34, 2017. DOI: 10.18225/lalca.v1i1.3071. Disponível em: <https://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/3071>.

ZHANG, X.; SHEN, L.; ZHANG, L. **Life Cycle Assessment of the Air Emissions during Building Construction Process: A Case Study in Hong Kong**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 17, 160-169. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.024>

ZHAO, X.Y.; MAO, X.W. **Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region: case of Zhangye**. Gannan and Linxia in Gansu Province. Shengtai Xuebao. v 33 (17). p. 5397–5406. 2013.