



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

PATRICIA BARROS VIANA

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE TELHAS CERÂMICAS
CONSIDERANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA QUEIMA E FONTE DE
ENERGIA ELÉTRICA COM APLICAÇÃO DOS OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)**

FORTALEZA

2024

PATRICIA BARROS VIANA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE TELHAS CERÂMICAS CONSIDERANDO
DIFERENTES MATERIAIS PARA QUEIMA E FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA
COM APLICAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL (ODS)

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: gestão e saneamento ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

Coorientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

BARROS VIANA, PATRICIA.

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE TELHAS CERÂMICAS CONSIDERANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA QUEIMA E FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA COM APLICAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS) / PATRICIA BARROS VIANA. - 2024.

83 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental, Campus Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Juceline Batista dos Santos Bastos.

Coorientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Inventário de ciclo de vida. 2. Produção de telhas cerâmicas. 3. Metas de desenvolvimento sustentável. 4. Ferramentas de software. I. Título.

CDD 628

PATRICIA BARROS VIANA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE TELHAS CERÂMICAS CONSIDERANDO
DIFERENTES MATERIAIS PARA QUEIMA E FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA
COM APLICAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL (ODS)

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito para obtenção do Título de mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: gestão e saneamento ambiental.

Aprovado (a) em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos (Orientadora)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza

Profa. Dra. Daniela Machado Lima Silva

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Perboyre Barbosa Alcântara

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Fortaleza

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor, meu Deus, por toda sua providência e apoio.

A Nossa Senhora, pelo seu carinho e cuidado de mãe.

Ao meu esposo, meu companheiro, por compartilhar dos momentos felizes e difíceis, sendo tão prestativo e cuidadoso comigo nessa caminhada.

A minha família, pelo zelo, carinho e incentivo sempre presentes.

Aos professores, que tanto contribuíram para que essa etapa se tornasse realidade, em especial a minha orientadora professora Juceline, por cada ensinamento, pela atenção sempre presente e correções. Professor Esequiel, também por todos os ensinamentos, incentivos, aconselhamentos antes mesmo do início dessa empreitada.

Ao Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA), em nome do professor Adeildo, por disponibilizar toda a sua estrutura, imprescindível neste trabalho, e sua ajuda e cordialidade em tantas dúvidas e situações que foram surgindo.

Aos amigos e colegas de estudo, em especial aos que me acompanharam durante o mestrado, por tornarem mais leves os momentos difíceis e por serem apoio nas situações mais precisas.

A todos que de alguma forma estiveram presentes, aos professores do PGTGA, a professora Glória e secretárias, sempre tão cordiais e atenciosas.

RESUMO

A construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais e emissores de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a indústria cerâmica se destaca como uma das mais intensivas em consumo de energia na queima de materiais combustíveis, contribuindo significativamente para as emissões de dióxido de carbono. Este artigo avalia o impacto ambiental da produção de telhas cerâmicas coloniais em uma indústria tradicional no Ceará, Brasil. Utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas ISO 14040 e 14044, o artigo compara dois cenários: um utilizando lenha e energia elétrica da rede local, e outro utilizando resíduos de fibras de algodão recicladas e energia solar. A análise abrange desde a extração da matéria-prima até o fim da produção, destacando a importância de práticas mais ecológicas na indústria cerâmica. Os impactos ambientais foram determinados para seis categorias de impacto através do método CML-IA *baseline* V3.10 e *software* SimaPro®. No Cenário 01, a maior contribuição para as categorias de impacto ambiental foi a utilização de lenha no processo de queima para a categoria aquecimento global (83,2%), seguida da argila extraída como matéria-prima para a categoria esgotamento abiótico (75,6%) e Toxicidade Humana (64,9%). No Cenário 02, a maior contribuição foi para a argila extraída para a categoria esgotamento abiótico (69,5%) e Toxicidade Humana (57,9%), seguida de seu transporte para oxidação fotoquímica (48,1%). A modificação da fonte de energia elétrica para energia solar contribuiu para a diminuição da influência nas categorias de oxidação fotoquímica e acidificação. Houve melhoria no desempenho ambiental do Cenário 02 com a substituição do combustível utilizado para queima de lenha por resíduo de fibra de algodão reciclado e no tipo de energia elétrica usada para energia solar, diminuindo a maioria das categorias de impactos ambientais avaliadas. Além disso, observou-se a contribuição do estudo para 7 objetivos de desenvolvimento sustentável e respectivas 13 metas para alcançar os objetivos propostos para a Agenda 2030. A metodologia utilizada possibilitou a análise do processo produtivo e das mudanças necessárias para a sua maior eficiência e sustentabilidade, reforçando a sua contribuição para o alcance de metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Nordeste brasileiro e a importância deste tipo de ferramenta..

Palavras-chave: Inventário de ciclo de vida. Produção de telhas cerâmicas. Metas de desenvolvimento sustentável. Ferramentas de *software*.

ABSTRACT

The construction industry is one of the largest consumers of natural resources and emitters of greenhouse gases. In this context, the ceramic industry stands out as one of the most energy-intensive industries in the burning of combustible materials, contributing significantly to carbon dioxide emissions. This article evaluates the environmental impact of the production of colonial ceramic tiles in a traditional industry in Ceará, Brazil. Using Life Cycle Assessment (LCA), according to ISO 14040 and 14044 standards, the article compares two scenarios: one using firewood and electricity from the local grid, and the other using recycled cotton fiber waste and solar energy. The analysis covers everything from the extraction of raw materials to the end of production, highlighting the importance of more environmentally friendly practices in the ceramic industry. The environmental impacts were determined for six impact categories using the CML-IA baseline V3.10 method and SimaPro® software. In Scenario 01, the largest contribution to the environmental impact categories was the use of firewood in the burning process for the global warming category (83.2%), followed by clay extracted as raw material for the abiotic depletion category (75.6%) and Human Toxicity (64.9%). In Scenario 02, the largest contribution was for clay extracted for the abiotic depletion category (69.5%) and Human Toxicity (57.9%), followed by its transportation for photochemical oxidation (48.1%). Changing the electrical energy source to solar energy contributed to reducing the influence on the photochemical oxidation and acidification categories. There was an improvement in the environmental performance of Scenario 02 with the replacement of the fuel used for burning firewood with recycled cotton fiber waste and in the type of electrical energy used for solar energy, reducing most of the environmental impact categories evaluated. Furthermore, the study's contribution to 7 sustainable development goals and respective 13 targets to achieve the objectives proposed for the 2030 Agenda was observed. The methodology used enabled the analysis of the production process and the changes needed for its greater efficiency and sustainability, reinforcing its contribution to achieving the goals of the sustainable development goals in the Brazilian Northeast and the importance of this type of tool.

Keywords: Life cycle inventory. Production of ceramic tiles. Sustainable development goals. Software tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de estudo.....	16
Figura 2 – Distribuição espacial de solo propício para a produção cerâmica.....	20
Figura 3 – Principais tipos de telhas.....	20
Figura 4 – Processo de fabricação de cerâmica vermelha.....	21
Figura 5 – Ciclo de produção da telha cerâmica.....	22
Figura 6 – Estrutura da avaliação de ciclo de vida.....	24
Figura 7 – Quadro com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs).....	30
Figura 8 – Localização do estudo.....	32
Figura 9 – Limites do sistema em estudo.....	34
Figura 10 – Fluxograma do processo produtivo.....	35
Figura 11 – Matéria-prima armazenada em pátio externo da indústria com os dois tipos de argilas utilizadas.....	36
Figura 12 – Placas fotovoltaicas para fornecimento de energia solar na indústria.....	37
Figura 13 – Entrada da matéria-prima no processo de fabricação.....	37
Figura 14 – Processo de homogeneização.....	38
Figura 15 – Etapa de laminação.....	38
Figura 16 – Corte das telhas cerâmicas.....	39
Figura 17 – Acondicionamento e transporte de telhas cerâmicas para secagem.....	40
Figura 18 – Processo de queima através de forno CEDAN.....	41
Figura 19 – Fardos de resíduo de fibra de algodão reciclado proveniente de indústria têxtil	41
Figura 20 – Telhas finalizadas para comercialização.....	42
Figura 21 – Quantificação das categorias de impacto ambiental nos Cenários 01 e 02....	51
Figura 22 – Simulação no software SimaPro da influência dos processos de produção das telhas cerâmicas para as categorias de impacto selecionadas.....	52
Figura 23 – Influência nos Cenários 1 e 2 nas categorias de impacto.....	53
Figura 24 - Análise de incerteza do Cenário 02 (A) menos o Cenário 01 (B)	57
Figura 25 - Resultado estatístico da Simulação Monte Carlo.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações consideradas para a construção do inventário de ciclo de vida.....	42
Tabela 2 – Parâmetros para a criação dos produtos lenha e fibra de algodão no SimaPro.....	46
Tabela 3 – Processos analisados e respectivas nomenclaturas no software SimaPro.....	47
Tabela 4 – Processos e dados para a produção de 0,5 m ² de telhas cerâmicas nos Cenários 01 e 02.....	49
Tabela 5 - Quantificação geral das categorias de impacto do estudo no software SimaPro....	50
Tabela 6 - Resultados da Simulação Monte Carlo na comparação dos cenários.....	58

LISTA DE SIGLAS

ABDE	Associação Brasileira de Desenvolvimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
BNB	Banco do Nordeste
CDB	Convenção das Nações Unidas sobre Diversidade Biológica
DAP	Declaração Ambiental de Produção
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEL/CE	Instituto Euvaldo Lodi
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LERCA	Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental
NBR	Norma Técnica Brasileira
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
SNF	Sistema Nacional de Fomento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações iniciais	14
1.2 Estrutura do trabalho	16
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Indústria ceramista	18
3.1.1 <i>Panorama do setor</i>	18
3.1.2 <i>Telhas cerâmicas coloniais</i>	19
3.1.3 <i>Processo produtivo</i>	21
3.2 A Avaliação do Ciclo de Vida	23
3.2.1 <i>Normatização</i>	25
3.2.1.1 <i>ISO 14001</i>	25
3.2.1.2 <i>ISO 14040 E 14044</i>	26
3.2.1.3 <i>ISO 14049 E 14071</i>	26
3.2.2 <i>Ferramentas</i>	26
3.2.2.1 <i>Base de dados Ecoinvent</i>	27
3.2.2.2 <i>Software SimaPro®</i>	27
3.2.2.3 <i>Método CML baseline V3.10</i>	28
3.2.2.4 <i>Análise das incertezas - Método de Monte Carlo</i>	28
3.3 Avaliação do Ciclo de Vida e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	29

4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Local de estudo.....	31
4.2 Estudo de ACV.....	32
<i>4.2.1 Definição de objetivo e escopo.....</i>	<i>32</i>
<i>4.2.2 Características do produto.....</i>	<i>33</i>
<i>4.2.3 Unidade funcional.....</i>	<i>33</i>
<i>4.2.4 Sistema.....</i>	<i>34</i>
<i>4.2.5 Fronteiras.....</i>	<i>34</i>
<i>4.2.6 Caracterização do processo de produção.....</i>	<i>35</i>
4.3 Elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....	42
4.4 Avaliação das melhorias aplicadas e impactos ambientais.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
5.1 Quantificação dos impactos ambientais nos cenários de estudo.....	49
5.2 Cenários antes e após a adoção das melhorias ambientais.....	52
<i>5.2.1 Comparação dos impactos ambientais nos cenários 01 e 02.....</i>	<i>52</i>
<i>5.2.2 Avaliação da incerteza por Monte Carlo.....</i>	<i>57</i>
5.3 Identificação das contribuições para metas dos ODS.....	60
6 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICE A — QUESTIONÁRIO BASE PARA COLETA DE INFORMAÇÕES....	72
APÊNDICE B — DADOS UTILIZADOS NO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA...75	75
APÊNDICE C — EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA INSERÇÃO DOS DADOS NO SIMAPRO.....	76

APÊNDICE D — RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS POR	
MONTE-CARLO.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

De acordo com Organização das Nações Unidas (ONU) para alcançar as medidas necessárias em diminuir os efeitos das mudanças climáticas mundialmente, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) trazem 17 objetivos onde os países possam lidar com os principais desafios ligados ao desenvolvimento, até o ano de 2023 (UNICEF, 2023). Segundo dados do IPCC (2023), em seu relatório de síntese AR6 publicado em 2023, reunindo os mais recentes conhecimentos sobre mudanças climáticas, comenta-se que os compromissos feitos pelos países membros provavelmente não serão suficientes para manter a temperatura em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, o que poderia evitar impactos maiores resultantes do aquecimento global.

As atividades humanas produzem certos danos ao meio ambiente, e o setor da construção civil, mesmo possuindo importância substancial na qualidade de vida da sociedade no desenvolvimento e estabelecimento das relações humanas, é considerado um dos maiores utilizadores de recursos naturais (Vieira *et al.*, 2023). Este setor corresponde com 39% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), 45 a 65% dos resíduos para aterros sanitários e 18% das emissões causadas pelo transporte e processamento da construção de materiais (Escamilla; Habert; Wohlmuth, 2016), além disso, as indústrias cerâmicas fazem parte deste setor e possuem posição de destaque.

A indústria cerâmica emite, mundialmente, cerca de 1,84 milhão de toneladas de dióxido de carbono por ano (Quinteiro *et al.*, 2022) e tem esse impacto devido principalmente à tecnologia e à energia que são empregadas na queima do forno e nas operações de secagem e conformação (European Ceramic Industry Association, 2021). Além disso, a produção mundial de telhas cerâmicas teve um aumento significativo onde países como a Espanha e Brasil se destacam pelo crescimento e melhorias no processo de produção (Monfort *et al.*, 2012). Estima-se no Brasil uma produção anual de aproximadamente 1,87 bilhão de telhas cerâmicas fabricadas (IBGE, 2020), além disso é considerado o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos do mundo, onde no ano de 2023, tem-se a projeção que foram produzidos 751 milhões de metros quadrados de cobertura entre pisos e ladrilhos (ANFACER, 2024).

A sustentabilidade na indústria da construção civil está relacionada com a conservação de energia, água e recursos naturais, através da reutilização, reciclagem, *design* inovador e minimização do desperdício e da poluição (Lima *et al.*, 2021). Medidas proativas precisam ser tomadas para reverter ou minimizar os impactos negativos que as atividades da construção têm sobre o meio ambiente (Aigbavboa; Ohiomah; Zwane, 2017). Com a crescente e importante conscientização sobre as mudanças climáticas, tendo como exemplo os relatórios propostos no âmbito das Nações Unidas (IPCC, 2023), aumenta-se a pressão por uma contribuição empresarial efetiva para resolver os desafios da sustentabilidade (Aguiar *et al.*, 2023).

A Convenção das Nações Unidas sobre Diversidade Biológica (CDB) propôs como uma das metas de negócio da nova Estrutura Global de Biodiversidade, que as empresas possam reduzir seus impactos negativos ao meio ambiente progressivamente pela metade e aumentem os impactos positivos voltados para a sustentabilidade das práticas de extração e produção, abastecimento, uso e descarte até o ano de 2030 (ONU, 2021). Além disso, a Associação Brasileira de Desenvolvimento (ABDE), visando a promoção dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pela ONU, divulgou o Plano ABDE 2030 de Desenvolvimento Sustentável, onde contará com o apoio de instituições do Sistema Nacional de Fomento (SNF) através de propostas de políticas públicas, gerando cerca de US\$ 380 bilhões em investimentos (Vazquez *et al.*, 2022), o que enfatiza a importância de ferramentas que possam abordar impactos ambientais globais.

A escassa quantidade de dados e indicadores de desempenho no setor cerâmico brasileiro de forma geral, fazem que ferramentas desse tipo sejam indispensáveis para o acompanhamento do desenvolvimento e melhoria da competitividade. É enfatizado a dificuldade de se ter um panorama mais amplo da indústria cerâmica, responsável por vários segmentos geradores de empregos e de forte apelo social (ABCERAM, 2023). Além disso, o conhecimento dos consumos térmicos envolvidos pelas indústrias da construção civil, como na fabricação de telhas, possibilita tomar medidas assertivas relacionadas às condições de operação dos equipamentos, evitando perdas e permitindo tomadas de decisões voltadas ao uso mais eficiente de energia, redução de custos e maior controle sobre as emissões de CO₂ (MONFORT *et al.*, 2012).

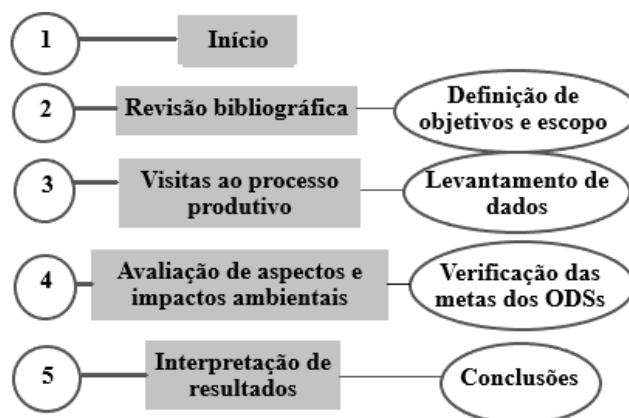
1.2 Justificativa

É importante enfatizar que a credibilidade dos resultados de um estudo de ACV depende significativamente da qualidade dos dados incluídos na etapa do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), onde são coletados e quantificados os dados dos fluxos de entrada e saída durante o ciclo de vida do produto (IBÁÑEZ-FORÉS; BOVEA; SIMÓ, 2011). As informações presentes na literatura e bases de dados diretamente relacionados com revestimentos cerâmicos acabam sendo escassas e orientadas para uma fase específica do seu ciclo de vida (IBÁÑEZ-FORÉS; BOVEA; SIMÓ, 2011). Desta forma, estudos mais abrangentes, considerando a regionalidade do local de produção do produto e orientado para todo o processo produtivo do produto ou da aquisição da matéria-prima até a saída para sua comercialização, conhecido como “do berço ao portão”, se possível, enfatizam a importância do presente trabalho e fazem-se necessários para se ter um melhor diagnóstico desse setor e de medidas que são possíveis para os desafios ambientais já previstos.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação foi organizada em cinco fases, conforme demonstrado na Figura 1. A primeira fase é composta pela introdução, contendo justificativa e objetivos. Na segunda fase foi realizada a revisão bibliográfica, auxiliando na definição do objetivo e escopo do estudo. A terceira fase, é composta pelas visitas à indústria, possibilitando o levantamento de dados. Já na quarta fase, tem-se a avaliação dos impactos, melhorias ambientais e metas da ODS, finalizando assim com a quinta fase, onde haverá a interpretação dos resultados existentes e consequentes considerações finais.

Figura 1 — Fluxograma de estudo



Fonte: Autora (2024).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo de ACV foi aplicado com objetivo de comparar o desempenho ambiental de telhas cerâmicas produzidas por uma indústria cerâmica do Nordeste brasileiro, a partir de processos de combustão com o uso de resíduo de fibras de algodão têxteis recicladas em forno contínuo e utilização de energia solar no processo produtivo juntamente das contribuições resultantes para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Quantificar os aspectos ambientais presentes no sistema de produção das telhas cerâmicas em estudo, desde a extração da matéria-prima até a fase final de produção;
- Comparar os impactos ambientais do ciclo de produção da telha cerâmica avaliando se há melhoria no cenário após a modificação do material para queima e fonte de energia elétrica solar;
- Relacionar as metas dos ODS que são influenciadas pela aplicação do inventário de ciclo de vida na produção de telhas cerâmicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Indústria ceramista

3.1.1 Panorama do setor

A produção mundial de revestimentos cerâmicos aproximadamente duplicou nos últimos dez anos. Países como o Brasil e a Espanha se destacam entre os principais países produtores de revestimentos cerâmicos (Monfort *et al.*, 2012). Além disso, estudos conduzidos ao longo da última década em universidades europeias têm enfatizado o notável desempenho dos materiais cerâmicos e seus benefícios ambientais. Esses avanços contribuem para o desenvolvimento de novos sistemas construtivos industrializados e sustentáveis (SEBRAE, 2023).

No ano de 2012, o Brasil foi considerado o segundo maior produtor desses revestimentos do mundo (Monfort *et al.*, 2012). De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2020), este setor foi responsável pela parcela de 30% da energia final utilizada em 2019 pela União Europeia, além de ser estrategicamente importante para o crescimento econômico e tendo participação fundamental nas metas de sustentabilidade (Quintero *et al.*, 2022).

A crescente produção de cerâmica vermelha, enquanto material da construção civil é influenciada pelo aumento da demanda habitacional, o que ocorreu na última década relacionada ao recente desenvolvimento econômico do país (Passuelo *et al.*, 2014). De acordo com o Sebrae (2023), há aproximadamente 5600 cerâmicas e olarias no Brasil, onde se trabalha com a argila transformando-a em uma peça cerâmica no primeiro caso, já o ceramista continua o processo, através da utilização de esmaltes e outras técnicas de acabamento. São produzidos cerca de 2,6 bilhões telhas cerâmicas, 5,7 bilhões de blocos e 1.526 toneladas de tubos mensalmente, representando um total de 8,3 bilhões desses produtos produzidos no país.

De acordo com Diagnóstico Socioeconômico da Indústria de Cerâmica Vermelha do Estado do Ceará feito no ano de 2012 pelo Instituto Euvaldo Lodi (IEL/CE) em parceria com a Sindcerâmica e o Banco do Nordeste (BNB), as duas áreas que se destacam na produção cerâmica cearense são a região metropolitana de Fortaleza e o Baixo Jaguaribe, no qual o município de Russas faz parte. Constatou-se que o estado do Ceará possui 412 cerâmicas presentes em 51% dos municípios, gerando cerca de 12 mil empregos diretos e 40 mil indiretos (FIEC, 2013).

A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas industriais têm contribuído para a evolução das indústrias cerâmicas brasileiras. Isso reflete na diversidade de produtos disponíveis, nos altos padrões de qualidade e na quantidade exportada (ABCERAM, 2023). Devido a fatores como maior densidade demográfica, atividade industrial e agropecuária e infraestrutura, as regiões Sudeste e Sul se destacam, concentrando polos e indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Apesar disso, a região Nordeste tem demonstrado certo grau de desenvolvimento devido ao aumento da demanda de materiais cerâmicos, principalmente no setor da construção civil. Esse crescimento tem motivado a instalação de novas fábricas na região (ABCERAM, 2023).

3.1.2 Telhas cerâmicas coloniais

A cerâmica possui a sua origem exata ainda obscura, onde estudos arqueológicos apontam para sua existência na pré-história, onde o homem começou a utilizar o barro endurecido pelo fogo, sendo considerada um dos materiais mais antigos já produzidos e base para a construção civil (COELHO, 2023). De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (2023), o termo cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Os materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil, como os tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas, além de utensílios de uso doméstico e de adorno, são conhecidos como cerâmica vermelha (ABCERAM, 2023).

A utilização da cerâmica vermelha pode ser caracterizada por fatores econômicos, sociais e culturais, por ser uma prática considerada característica da época da formação da nação. De acordo com Anfacer (2023), a utilização da cerâmica no Brasil teve início com a cultura indígena, na Ilha de Marajó, localizada no estado do Pará, tendo também estudos arqueológicos que apontam para o seu uso mais simples na região amazônica por volta de cinco mil anos atrás. Outro fator que contribui para a utilização desse material é a disponibilidade de jazidas de argila para cerâmica vermelha ao longo do território brasileiro (Carvalho, 2018), como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 — Distribuição espacial de solo propício para a produção cerâmica



Fonte: Motta (2004); adaptação Carvalho (2008).

Entre os produtos disponíveis da indústria cerâmica vermelha, destacam-se as telhas cerâmicas. Elas possuem várias formas e cores, estando os principais tipos representados na Figura 2. Dentre as diversas alternativas, um dos modelos tradicionais utilizados no país é a telha portuguesa natural, que possui dimensões médias $41 \text{ cm} \times 23 \text{ cm} \times 1,2 \text{ cm}$, com um peso de 2,3 kg e rendimento de 15 telhas/m² (Cerâmica Silva, 2022b). O custo deste tipo de telha é de cerca de R\$ 1,71 por unidade, ou R\$ 29,07 o metro quadrado (Leroy Merlin, 2022b).

Figura 3 — Principais tipos de telhas

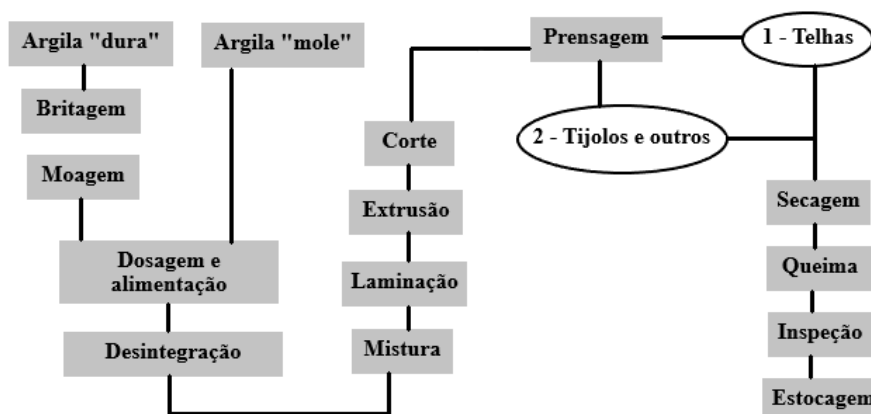


Fonte: Sua obra (2019).

3.1.3 Processo produtivo

O processo de fabricação empregado pelos segmentos cerâmicos, geralmente assemelham-se em parte ou totalmente, diferindo de acordo com o tipo de peça ou material desejado. De forma geral, eles compreendem as etapas de preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento, no qual alguns tipos de produtos são submetidos a esmaltação e decoração (ABCERAM, 2023). As etapas utilizadas para fabricação estão demonstradas na Figura 4.

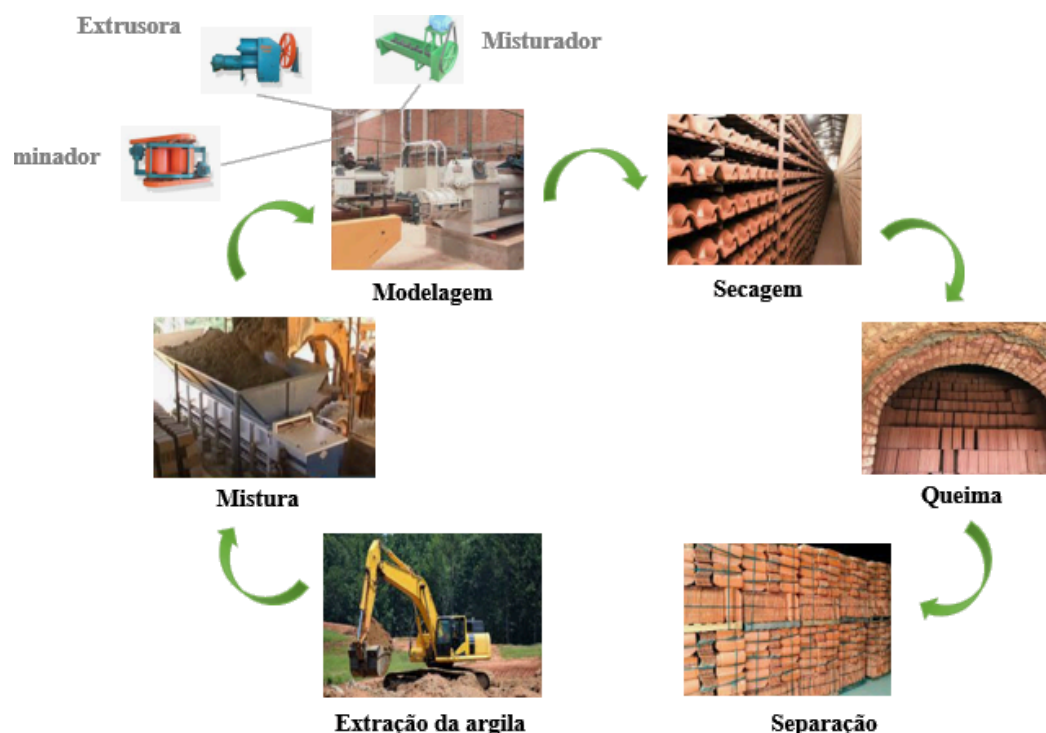
Figura 4 — Processo de fabricação de cerâmica vermelha



Fonte: Adaptado de Abceram (2023).

O ciclo do processo de fabricação das telhas cerâmicas, parte integrante do fluxograma da Figura 4, é ilustrado na Figura 5. Inicialmente é necessário que seja feita a preparação da matéria prima, onde frequentemente utiliza-se o solo argiloso natural presente em depósitos espalhados na crosta terrestre (ABCERAM, 2023). A argila ao possui partículas de tamanho microscópico, menores que 0,002 mm, não visíveis a olho nu, que possuem características de plasticidade, permitem que ela seja moldada na forma desejada, com características de dureza e resistência ao ser misturada a água e após sua secagem e cozimento (Cabral; Motta; Tanno, 2009). Com a mineração, os materiais são beneficiados, desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria e se necessário, purificados (ABCERAM, 2023).

Figura 5 — Ciclo de produção da telha cerâmica



Fonte: Autora (2023).

No processo de extrusão, a massa plástica é colocada numa extrusora onde será compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal com determinado formato, obtendo-se uma coluna extrudada com seções transversais e dimensões desejadas, no qual em seguinte passará pelo corte da peça, e no caso das telhas cerâmicas, a prensagem, podendo ser utilizados vários tipos de prensas, como fricção, hidráulica e hidráulica-mecânica, entre outras (ABCERAM, 2023).

O tratamento térmico das peças é responsável pelo desenvolvimento das propriedades finais dos produtos, compreendido pelas etapas de secagem e queima. Após a etapa de formação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da preparação da massa. Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminá-la de forma lenta e gradual, em galpões de secagem ou em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas que variam de 50 a 150°C, visto que o tempo de duração da secagem natural pode chegar até 30 dias, dependendo do material utilizado e das condições climáticas locais (BANCO DO NORDESTE, 2008; ABCERAM, 2023).

Na operação de queima, conhecida também por sinterização, as peças secas são submetidas a um tratamento térmico com temperaturas entre 850°C e 950°C, em fornos

contínuos ou intermitentes. A sinterização possibilita que os produtos passem por processos de perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos, resultando em suas propriedades finais. Na etapa de queima do produto, faz-se uso de uma grande quantidade de energia, proveniente da queima de combustíveis, juntamente da produção de cinzas e emissão de compostos, como o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (Nox), entre outros (ABCERAM, 2023).

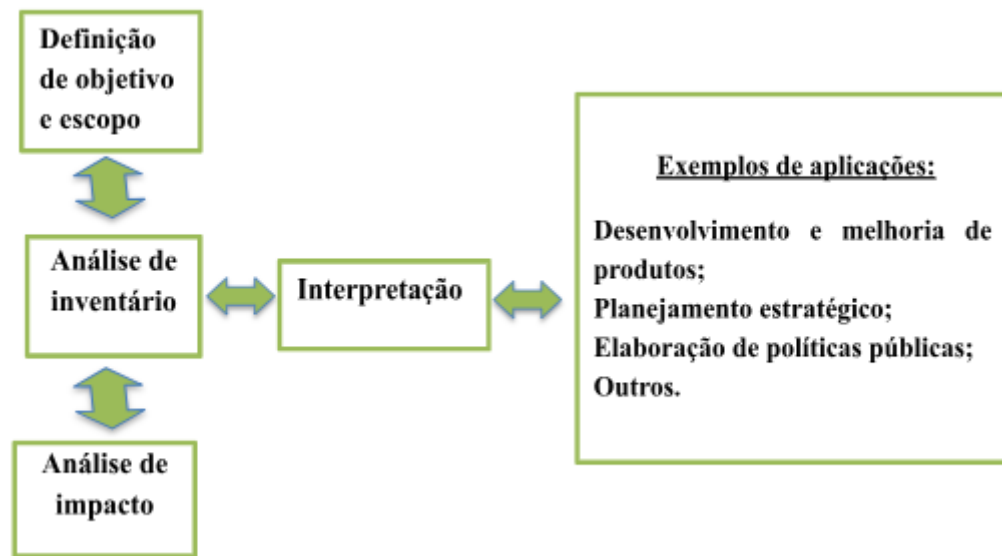
Por fim, a maioria dos produtos cerâmicos são retirados dos fornos e inspecionados para o controle da qualidade final, podendo ser realizados testes de torção, das dimensões, sonoridade, permeabilidade e empenamento (NUNES; RESENDE, 2013). Além disso, alguns produtos acabam requerendo processamento adicional para atender a algumas características, podendo incluir polimento, corte, furação, entre outros, conhecido genericamente como acabamento. Em seguida os lotes são estocados e colocados para expedição (ABCERAM, 2023).

3.2 A Avaliação do Ciclo de Vida

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira (NBR), *International Standards Organization (ISO)* 14040 define a ACV como sendo a avaliação e compilação de entradas, saídas e de impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2009). Com o objetivo de avaliar os potenciais impactos ambientais agregados ao longo do ciclo da vida de um produto, a ACV foi padronizada, possibilitando a facilitação dos processos de tomada de decisão e uma comparação quantitativa dos potenciais impactos ambientais.

De acordo com a norma ISO 14040 de 2009, um estudo de ACV deve ser estruturado de forma a incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados (ABNT, 2009), como ilustrado na Figura 6. Desta forma, através da quantificação dos recursos utilizados e das emissões associadas ao ciclo de vida, tendo como referência uma unidade funcional, os recursos quantificados e as emissões são agrupadas para formar o Inventário de Ciclo de Vida (ICV), que posteriormente será avaliado na etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (VIEIRA *et al.*, 2023).

Figura 6 — Estrutura da avaliação de ciclo de vida



Fonte: Adaptado de NBR ISO 14040 (2009).

Com a etapa de definição de objetivo e escopo sendo a primeira fase para a realização de uma ACV, defini-se o objetivo do estudo em questão, demonstrando quais as razões para a sua aplicação e o público-alvo a que se refere. Com o escopo possibilita-se a definição se o estudo será focado em um processo ou será uma comparação com vários, determinando também a sua unidade funcional, que servirá de unidade de referência do estudo, seus limites e a alocação dos impactos ambientais (Vieira *et al.*, 2023).

A etapa de análise de inventário compreende a coleta de dados necessários para o estudo em questão, sendo quantificado os fluxos de entrada e saída de materiais e energia durante o ciclo de vida do produto. Todas as fases do ciclo de vida são indispensáveis para a avaliação, mas os pesquisadores reconhecem esta fase como a mais importante, além disso, a qualidade dos dados é essencial para a credibilidade dos resultados da ACV nesta fase (Ibáñez-Forés; Bovea; Simó, 2011; Ivanica *et al.*, 2022).

Já na etapa de avaliação ou análise de impacto, objetiva o entendimento e a avaliação da relevância e significância dos impactos ambientais de um sistema de produto durante seu ciclo de vida. A etapa de avaliação de impacto envolve a conversão dos resultados da ACV em informações úteis para a tomada de decisão, destacando as partes mais relevantes do estudo (ABNT, 2009).

Por fim, com a fase de interpretação, os resultados obtidos no inventário e na avaliação de impactos são analisados, servindo como base para conclusões, recomendações e tomadas

de decisão, de acordo com os objetivos e escopo definidos. Esta fase é responsável por fornecer resultados consistentes com os objetivos e escopo definidos inicialmente, levando a conclusões e tomadas de decisão bem fundamentadas (ABNT, 2009).

3.2.1 Normatização

Para a análise de ciclo de vida dos revestimentos cerâmicos, como o caso das telhas vermelhas, é imprescindível seguir as normas técnicas estabelecidas. Essa abordagem permite a padronização das análises e a identificação de ações corretivas pertinentes. Ao longo dos anos, diversos padrões de normatizações foram surgindo. A seguir, são apresentadas as principais normas padronizadas pela Organização Internacional de Padronização (ISO) relacionadas à ACV apresentadas por meio das Normas Técnicas Brasileiras (NBRs).

3.2.1.1 ISO 14001

A ISO 14001 é uma norma ambiental internacional que trata dos requisitos e auxilia no âmbito dos sistemas de gestão ambiental, na elaboração de políticas e metas, especificando as medidas necessárias que permitem a uma organização alcançar os resultados pretendidos em seu sistema de gestão ambiental, estando entre elas: a definição de uma política ambiental, a identificação e avaliação de aspectos ambientais, o estabelecimento de objetivos e metas ambientais, a implementação de procedimentos, a conformidade com requisitos legais e realização de auditorias e revisões.

Tendo a sua primeira publicação em 1996, após revisão e atualização, encontra-se disponível a sua terceira edição do ano de 2015, substituindo a também publicada em 2004 (ABNT, 2015).

3.2.1.2 ISO 14040 E 14044

As normas ISO 14040 e 14044 tratam da gestão ambiental no âmbito da ACV, sobre seus princípios e estruturas, e seus requisitos e orientações, respectivamente. Com a vigência da segunda edição, a ABNT NBR ISO 14040 também detalha os requisitos mínimos para a condução de uma ACV, sendo ela dividida em quatro fases: definição de objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida (ICV), Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados.

Enquanto isso, a ABNT NBR ISO 14044 é uma norma complementar que especifica os requisitos e as orientações para a ACV, abrangendo os estudos de ACV e os estudos de inventário do ciclo de vida (ICV) (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

3.2.1.3 ISO/TR 14049 E ISO/TS 14071

Há também a criação em 2014, da ISO/TR 14049, com o intuito de facilitar o entendimento da norma ISO 14044, trazendo exemplos ilustrativos de como aplicá-la, a definição de objetivo e escopo e a análise de inventário. Já em 2018, devido à crescente utilização da própria ACV, bem como à aplicação mais ampla em ferramentas como pegada de carbono ou iniciativas futuras de rotulagem, a NBR ISO/TS 14071 fornece requisitos adicionais e diretrizes à ISO 14044, relacionados à análise crítica e às competências requeridas do analista (ABNT, 2014; ABNT, 2018).

3.2.2 Ferramentas

Diante da necessidade expressiva de dados coletados para a fase de ICV da ACV, a qualidade desses dados é essencial para a credibilidade dos resultados desta etapa (IVANICA *et al.*, 2022). A elaboração de um ICV é uma tarefa minuciosa em um estudo de ACV devido à grande quantidade de recursos requeridos para se obter informações atualizadas e confiáveis, além dos dados que acabam não sendo possíveis de serem coletados durante o processo de produção (IBÁÑEZ-FORÉS; BOVEA; SIMÓ, 2011). As ferramentas utilizadas para auxiliar na execução da etapa de ICV deste trabalho estão apresentadas a seguir.

3.2.2.1. Base de dados Ecoinvent

De acordo com Ibáñez-Forés, Bovea e Simó (2011), considerando as bases de dados de ICV, apenas a base *Ecoinvent* e a *Idemat* incluem dados de inventário de revestimentos cerâmicos na categoria materiais de construção. A ferramenta *Ecoinvent* é uma base de dados reconhecida mundialmente, seu banco de dados possui um repositório que abrange mais de 20000 conjuntos de dados acerca de atividades e processos humanos. Com a sua última atualização para a versão 3.10 incluiu-se setores de agricultura, construção, produtos químicos, eletricidade, silvicultura, combustíveis, resíduos, entre outros (Ecoinvent, 2024). Para a realidade no Brasil, de acordo com Souza *et al.* (2015), a maioria dos estudos brasileiros de ACV, inclusive os relacionados ao setor cerâmico, utilizam o *Ecoinvent* e o adaptam para a realidade mais próxima do país.

3.2.2.2 Software SimaPro®

O SimaPro® é um sistema de *software* de modelagem e avaliação de produtos criado em 1994, sendo desenvolvido e operado na Holanda pela empresa PRéConsultants e vendido em todo o mundo (ACV Brasil, 2024). O *software* utiliza como ferramentas (Herrmann; Moltesen, 2015):

- a) um banco de dados para consulta de dados secundários;
- b) uma aba para o usuário descrever ou sistema para seu produto;
- c) uma calculadora que combina os números do banco de dados de acordo com o produto;
- d) um banco de dados de avaliação de impactos com dados provenientes de várias metodologias.

Devido à complexidade da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), várias ferramentas de *software* estão disponíveis para auxiliar na sua aplicação, como a Open LCA, SimaPro, Umberto NxT, GaBi, QuantisSuite e Model Bousted (Morini; Ribeiro; Hotza, 2019). Entretanto, no estudo de Vieira *et al.* (2023), foram identificados 11 pacotes de *softwares* para estudos de análises de ciclo de vida de revestimentos cerâmicos, estando o SimaPro em mais de 50% das análises.

3.2.2.3 Método CML baseline V3.10

O método CML *baseline* V3.10 faz parte de uma metodologia de ACV desenvolvida pelo Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda (Guinée *et al.*, 2002). A versão 3.10 é uma das mais atualizadas deste método através da aplicação do *software* SimaPro 8.5.0 e base de dados *Ecoinvent* 3.5 (PRé Sustainability, 2024).

Este método está alinhado à norma europeia EN 15804, que define as regras básicas de categoria de produto para declarações ambientais de produtos e serviços de construção, sendo baseado em uma abordagem *midpoint* no qual seus modelos de caracterização foram selecionados em uma extensa revisão das metodologias existentes no mundo e o seu manual fornece fatores de caracterização para mais de 1.500 resultados diferentes de ICV (Mendes *et al.*, 2016).

3.2.2.4 Análise das incertezas - Método de Monte Carlo

Com o aumento do uso do método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) devido a crescente necessidade de quantificação de emissões, consumo de matéria prima, depleção de recursos, impactos ambientais relacionados a sistemas de produtos ou serviços, houve um maior interesse pelo estudo das incertezas que estão envolvidas (Noshadravan *et al.*, 2013). Ao apresentar resultados determinísticos para uma ACV é superestimada sua exatidão, podendo influenciar no processo de tomada de decisão (Baek *et al.*, 2018), no qual em uma ACV as incertezas de parâmetro são de certa forma inerentes aos dados e ignorar essas incertezas pode fragilizar a interpretação dos resultados da avaliação (Sonnemann *et al.*, 2003).

Para compreender a influência combinada de todas as incertezas de entrada, a análise estatística de Monte Carlo é usada para calcular a incerteza dos resultados da ACV ou quanto de intervalo ou dispersão há nos resultados reais, com base em entradas variáveis. Desta forma, geralmente podemos descrever a incerteza em processos industriais por uma distribuição lognormal para os parâmetros, onde os valores de extrema direita também serão amostrados e a mediana acaba representando o valor mais típico para representar a realidade (Mark Goedkoop *et al.*, 2014).

Com a realização da simulação no SimaPro, especificamos que desejamos fazer uma análise de Monte Carlo para comparar dois produtos. As ACVs para os dois produtos serão executadas e para cada interação, será calculado o valor de "o impacto do produto A menos o

impacto do produto B", formando uma distribuição de probabilidade que pode ser usada para analisar qual produto é o melhor e a porcentagem de certeza nisso (Mark Goedkoop *et al.*, 2014).

Assim, ao iniciar a simulação, é pego um valor aleatório da distribuição de incerteza para cada entrada de dados incertos e calculado os resultados da ACV para esses valores amostrados, sendo o procedimento ou número de interações repetidos significativas vezes e formando uma distribuição de incerteza para o resultado final, ou seja, nesta abordagem o computador pega uma variável aleatória para cada valor dentro da faixa de incerteza que especificamos e recalcula os resultados, armazenando-os. Este cálculo é repetido com diferentes amostras dentro da faixa de incerteza, com o número de vezes estipulado na simulação, onde as respostas formarão uma distribuição de incerteza. Em geral, assume-se que a variação entre os produtos é significativa se 90% das corridas de Monte Carlo forem favoráveis a um produto analisado (Mark Goedkoop *et al.*, 2014).

Entre os tipos de distribuição padrão que podem ser escolhidos para traduzir a informação sobre a incerteza, a distribuição lognormal é considerada uma das mais importantes dentro de um estudo de ACV, podendo ser considerada padrão. Elas ocorrem quando valores com distribuição normal são multiplicados e isto acontece com frequência em estudos de ACV (Mark Goedkoop *et al.*, 2014).

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, fazem parte de 17 relevantes e interconectados objetivos que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no mundo, conforme representados na Figura 7 (ONU, 2023). Eles representam um plano de ação global que visa abrangentes medidas, entre elas relacionadas a: eliminar a pobreza extrema e a fome, oferecer educação de qualidade ao longo da vida dos indivíduos, proteger o planeta terra, promovendo também sociedades pacíficas e inclusivas até 2030 (UNICEF, 2023).

Figura 7 — Quadro com os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs)



Fonte: ONU (2023).

No ano de 2015, os Estados-membros das Nações Unidas (ONU) comprometeram-se na adoção da chamada Agenda Pós-2015, conhecida também como Agenda 2030, considerada uma das mais ambiciosas metas da história da diplomacia internacional. Ela é uma resolução política que propõe um conjunto abrangente e de longo alcance de metas e objetivos universais e transformadores centrado nas pessoas, onde estão incluídos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, juntamente de 169 metas associadas, no qual a partir dela, os países trabalharão para implementação total dessas até o ano 2030 (UNICEF, 2023).

A Agenda 2030 através de seus objetivos e metas, representa um certo quadro político para que as empresas contribuam efetivamente para o desenvolvimento sustentável durante o longo prazo, no qual descreve diretrizes para o que será necessário, aceito e exigido pelas sociedades e pelos mercados nas próximas décadas (Johnsson *et al.*, 2020). De acordo com Pedersen (2018), os ODS representam uma provável e talvez a melhor perspectiva estratégica de mercado a longo prazo que já foi apresentada às empresas, onde provavelmente a maioria delas acabarão sendo obrigadas a trabalhar de forma diferente, e em muitos casos, fazer coisas diferentes.

Segundo o último e sexto relatório de síntese do IPCC, que reúne os mais recentes conhecimentos referentes às mudanças climáticas sobre o que está sendo enfrentado e o que pode ser feito para limitar os aumentos globais de temperatura, mesmo que todos os países implementem os seus compromissos climáticos assumidos, não será o suficiente para manter o aquecimento global em 1.5°C acima dos níveis pré-industriais, o que os cientistas dizem ser

necessário para evitar os piores impactos das mudanças climáticas IPCC (2023). Além disso, os esforços atuais ainda são considerados dispersos, também em relação a algumas das comunidades mais vulneráveis.

Desta forma, as grandes empresas são exigidas por vários países que façam publicações de relatórios regulares sobre os impactos sociais e ambientais das suas atividades (Loannou; Serafeim, 2017). De acordo com Loannou e Serafeim (2017), elas também aumentaram voluntariamente a credibilidade da divulgação de resultados através, por exemplo, de diretrizes de relatos e garantias de terceiros. Avaliar os tipos de impacto torna-se essencial para analisar as contribuições tanto positivas como negativas feitas pelas empresas para o cumprimento dos ODS (Toppo *et al.*, 2017), onde a ACV surge como um método de quantificação de impactos ambientais, capaz de apoiar processos de tomada de decisão, operacionalizando as metas de sustentabilidade e consequente desenvolvimento mais sustentável (Keiser *et al.*, 2023).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia estabelecida neste trabalho para consequente avaliação ambiental do processo produtivo da telha cerâmica vermelha foi estabelecida com a aplicação da ferramenta de ACV em diferentes fases. As etapas que foram desenvolvidas serão apresentadas e detalhadas a seguir, nos itens subsequentes.

4.1 Local de estudo

Segundo estimativas do IBGE (2022), a cidade de Russas, município cearense de 1590 km², possui 72928 habitantes, com a 15ª maior população e o 23º PIB do estado, estando localizada a 165 km da capital do Ceará, às margens da BR-116. O município faz parte dos que formam a região conhecida como Vale do Jaguaribe, onde se concentram boa parte dos polos ceramistas do estado. As indústrias de cerâmica vermelha ou estrutural, no qual possuem as telhas e os tijolos como os principais produtos comercializados para o próprio estado e para alguns da região nordeste, consistem em uma das principais atividades econômicas da região, devido a abundância de argila de boa qualidade que constitui a principal matéria prima para a indústria da cerâmica vermelha (Deodato, 2019).

A empresa escolhida para o estudo de caso trata-se de uma cerâmica de pequeno porte, localizada na cidade de Russas – CE, conforme demonstrado na Figura 6. Seu crescimento acaba sendo ditado pela demanda do setor da construção civil, tendo seus principais clientes

localizados nas cidades de Itapipoca – CE, Guaraciaba do Norte – CE, Parajuru – CE, Teresina – PI, Upanema – RN e Cabaceiras do Paraguaçu – BA.

Figura 8 — Localização do estudo



4.2 Estudo de ACV

4.2.1 Definição de objetivo e escopo

Este estudo de ACV foi aplicado com objetivo de comparar o desempenho ambiental de telhas cerâmicas produzidas a partir de processos de combustão com o uso de resíduo de fibras de algodão têxteis recicladas em forno contínuo e utilização de energia solar para o processo produtivo.

Entre as razões para a condução deste estudo, tem-se a necessidade de conhecer os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida na indústria cerâmica após adoção de medidas voltadas à sustentabilidade, possibilitando disponibilizar dados adequados à realidade atual de parte do Nordeste brasileiro.

O público-alvo a quem este trabalho é destinado, são os usuários da ferramenta de ACV, tanto na área acadêmica, como empresarial, no qual gerentes de processos, analistas, entre outros, precisam de recursos e pesquisas sobre materiais da indústria de construção, e em que as conclusões e recomendações podem também subsidiar outros tipos de pesquisas e outras ACV.

4.2.2 Características do produto

Neste estudo, a telha cerâmica vermelha tem a finalidade de ser utilizada na cobertura de diferentes tipos de edifícios e construções, sendo considerada como um tipo de produto no ramo da construção civil proveniente da indústria cerâmica.

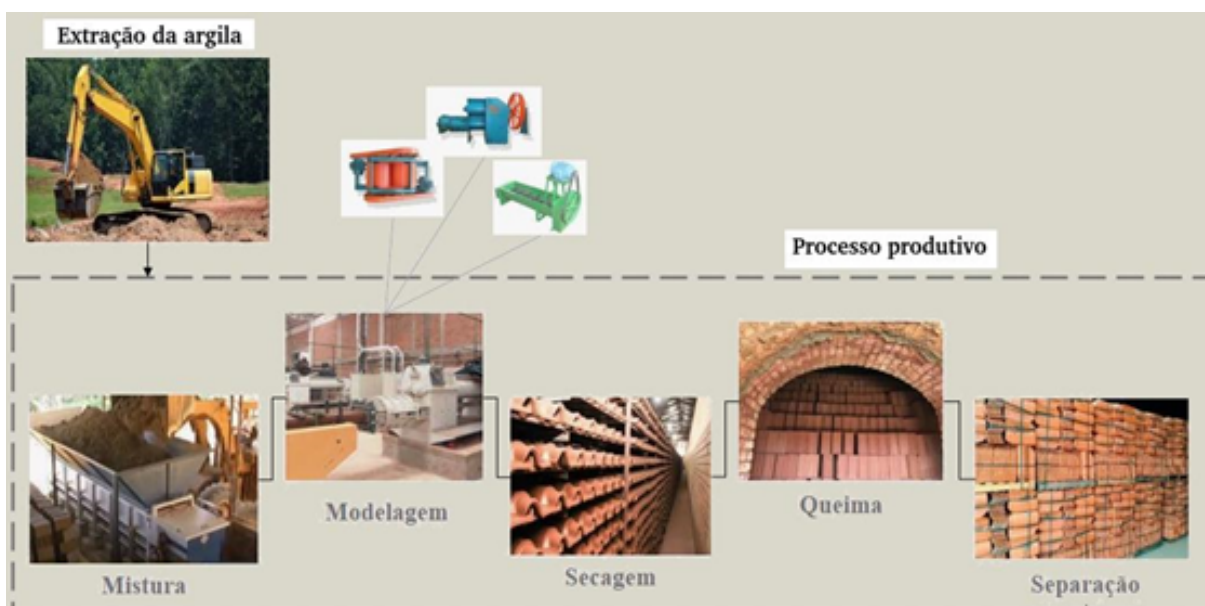
4.2.3 Unidade funcional

A unidade funcional definida para esse estudo é de 0,5 m² de telhas cerâmicas, que correspondem a 16 unidades no produto. O fluxo de referência definido foi igual a unidade funcional, ou seja, a produção de 0,5 m² de telhas cerâmicas.

4.2.4 Sistema

Considerando a disponibilidade de dados necessários e o foco do estudo, optou-se por limitar o sistema analisado a partir da fase de extração de matéria-prima até a finalização dos produtos, através da indústria cerâmica que modificou os processos de combustão para resíduos têxteis de fibra de algodão reciclada e energia solar para a confecção de seus produtos, neste caso, a telha em estudo. Os limites dos sistemas estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9 — Limites do sistema em estudo



Fonte: Autora (2024).

4.2.5 Fronteiras

A fronteira geográfica foi definida a partir da utilização de uma olaria ou indústria cerâmica com processo produtivo voltado para a fabricação de telhas e tijolos, localizada em um polo ceramista do Estado do Ceará, no qual seus produtos são comercializados no próprio Estado e em outros na região Nordeste brasileira.

Para a elaboração do inventário e posterior análise, foram realizadas visitas técnicas à indústria onde se realiza a fabricação das telhas em estudo com a aplicação de questionários e coleta de dados relativos aos fluxos de materiais, energia e água associados à produção. Os outros insumos presentes dentro do sistema tiveram as suas informações obtidas da literatura e de processos disponíveis na base de dados *Ecoinvent*, relacionadas à materiais de construção por meio de dados secundários.

Em relação a fronteira temporal foram coletados dados referentes ao período de janeiro a dezembro do ano de 2023.

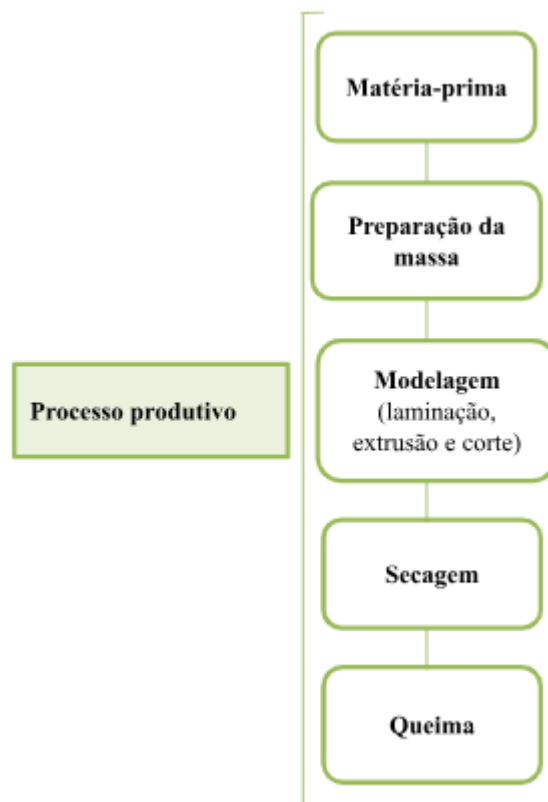
No âmbito das fronteiras tecnológicas, a partir das pesquisas realizadas, observou-se que a empresa utiliza processo produtivo geral semelhante ao de outras indústrias produtoras brasileiras. Uma das diferenças tecnológicas encontradas está no tipo de forno utilizado, de

operação semi-contínua conhecido como forno CEDAN, composto por 14 câmaras de aquecimento contínuo, em que o calor gerado é acumulado e reaproveitado para o aquecimento das câmaras seguintes. Além disso, a fábrica modificou a matriz energética para a queima a partir do reaproveitamento da fibra de algodão residual reciclada de uma Indústria têxtil localizada na região e com o seu fornecimento de energia elétrica a partir de placas solares instaladas na empresa.

4.2.6 Caracterização do processo de produção

Com o intuito de se obter dados de qualidade e resultados de ACV confiáveis, uma das etapas requeridas foram as visitas realizadas à Indústria Cerâmica em questão. Por meio do levantamento de dados com a aplicação de questionários (APÊNDICE A), consulta à literatura e base de dados *EcoInvent*, buscou-se por dados mais próximos possíveis da realidade brasileira, possibilitando a caracterização do processo produtivo em estudo, conforme Figura 10.

Figura 10 — Fluxograma do processo produtivo



Fonte: Autora (2024).

Primeiramente, as duas matérias-primas trazidas em grandes lotes das jazidas e formada por solos, predominantemente argilosos, são armazenada em camadas na parte externa da indústria, facilitando a mistura da argila no momento de retirada dos montes de estocagem (MINEROPAR, 2007) (Figura 11), possibilitando a sua separação e preparação para as etapas seguintes.

Figura 11 — Matéria-prima armazenada em pátio externo da indústria com os dois tipos de argilas utilizadas



Fonte: Autora (2023).

Além disso, é importante ressaltar que toda energia elétrica responsável por manter os maquinários e funcionamento geral da indústria cerâmica é proveniente do fornecimento de energia solar através de placas fotovoltaicas instaladas em sua área externa (Figura 12).

Figura 12 — Placas fotovoltaicas para fornecimento de energia solar na indústria



Fonte: Autora (2023).

Para o início do processo de fabricação, ou etapa de modelagem, com o auxílio de uma retroescavadeira, a argila preparada é colocada em um grande reservatório, chamado “caixão alimentador” onde será fornecida ao sistema e em seguida será conduzida para as outras etapas por meio de esteiras, como demonstrado na Figura 13.

Figura 13 — Entrada da matéria-prima no processo de fabricação



Fonte: Autora (2023).

A preparação e homogeneização das argilas é feita através de um misturador horizontal com filas duplas de pás helicoidais, conforme Figura 14, onde ocorre a homogeneização dos dois tipos de argila (“mais úmida”, “mais seca”) e água.

Figura 14 — Processo de homogeneização



Fonte: Autora (2023).

A Figura 15 representa a fase de laminação, no qual é proporcionado também a homogeneização e desintegração da argila. O laminador, composto por dois cilindros, gera atrito e desintegra o material devido a diferentes velocidades, funcionando tanto como homogeneizador e triturador. A qualidade da laminação torna-se determinante na qualidade de acabamento dos produtos, evitando perdas e redução no consumo de energia necessária à queima, devido a granulometria do material que diminui (NUNES; RESENDE, 2013).

Figura 15 — Etapa de laminação



Fonte: Autora (2023).

Após a etapa de laminação, inicia-se a conformação da massa argilosa por meio do processo de extrusão. A extrusão consiste em forçar a massa preparada para ser compactada por meio de um pistão ou eixo helicoidal, onde se obtém a coluna de argila extrudada que, por

meio de um cortador, recebe cortes de acordo com a dimensão desejada para o material (Figura 16) (NUNES; RESENDE, 2013). Assim, com o processo de modelagem concluído, segue-se para a fase de secagem do material.

Figura 16 — Corte das telhas cerâmicas



Fonte: Autora (2023).

A fase de secagem é iniciada com o transporte das telhas produzidas e acondicionadas para a estufa, como ilustra a Figura 16. No caso dos secadores estáticos, como as estufas ou secadores de câmara, eles possuem a função de elevar a temperatura inicial ambiente do material cru a aproximadamente 100°C, através do aquecimento interno e recirculação do ar com o auxílio de ventiladores ou secadores específicos. O período de permanência das peças na estufa é de aproximadamente 24 h, critério definido pelo ceramista com base nas experiências de produção.

Figura 17 — Acondicionamento e transporte de telhas cerâmicas para secagem



Fonte: Autora (2023).

Durante o processo de queima, também conhecido como cozimento ou cocção, as telhas cerâmicas adquirem suas propriedades finais. Nessa fase ocorrem as transformações envolvendo as variações da estrutura química e cristalina, além da dilatação, porosidade e resistência mecânica, devido à ação do fogo nas argilas (Santos, 2006).

O material cerâmico é queimado em forno semi-contínuo, também conhecido como forno CEDAN, formado por 14 câmaras, onde as temperaturas atingem aproximadamente 800°C e proporciona-se o reaproveitamento de até 80 % do calor gerado na queima, além da redução de 65% no uso de lenha e na emissão de poluentes (Dantas, 2008). Passa-se pelos estágios de pré-aquecimento, temperatura máxima, sustentação da temperatura, até o resfriamento (Mineropar, 2000), no qual devido a probabilidade de trincas, o mesmo deve ocorrer lentamente, durando em torno de 38 a 50 h (Santos, 2006), conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 — Processo de queima através de forno CEDAN



Fonte: Autora (2023).

Para o fornecimento de energia necessária no processo de queima do forno CEDAN, são utilizados pela indústria cerâmica como combustível alternativo, o resíduo da fibra de algodão reciclada como demonstrado na Figura 19, proveniente de indústria têxtil localizada no município vizinho de Jaguaruana, cerca de 27 km de distância e voltada para a fabricação de fios de algodão reciclados, destinados originalmente ao artesanato (Jaguaruana Têxtil LTDA, 2023).

Figura 19 — Fardos de resíduo de fibra de algodão reciclado proveniente de indústria têxtil



Fonte: Autora (2023).

Finalizado o processo de queima, as telhas cerâmicas já resfriadas, irão passar pelo controle de qualidade, a fim de verificar a conformidade com as normas técnicas vigentes, sendo separadas e em seguida prontas para a comercialização (Figura 20).

Figura 20 — Telhas finalizadas para comercialização



Fonte: Autora (2023).

4.3 Elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Para a etapa de Inventário de Ciclo de Vida, foram coletados dados referentes aos fluxos de materiais, energia e água, juntamente da utilização de equações para transformação nas unidades requeridas pelo *software* SimaPro versão 8.0.3.14, licenciado pelo Laboratório de Energias Renováveis e Conforto Ambiental (LERCA) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

A coleta de dados foi realizada através de visitas técnicas à indústria com a aplicação de questionários, no qual o modelo base de questionário e as informações utilizadas estão apresentados respectivamente no APÊNDICE A e B. As informações adicionais foram obtidas da literatura e através da base de dados *Ecoinvent*, por meio de dados secundários.

As entradas e saídas dos subsistemas analisados estão representadas na Tabela 1, demonstrando os fluxos considerados no sistema de inventário de ciclo de vida da produção de revestimentos cerâmicos.

Tabela 1 — Informações consideradas para a construção do inventário de ciclo de vida

Etapas	Descrição	Fonte de dados
--------	-----------	----------------

	Quantidade de combustível utilizado por retroescavadeira para retirada de argila fornecidos pela indústria cerâmica e para emissões atmosféricas foi utilizado o banco de dados Ecoinvent 3.5.
E1	Quantidade de matéria-prima fornecida pela indústria cerâmica.
Extração de argila	
Argila extraída	
Transporte do material extraído	Quilometragem e número de viagens fornecidos pela indústria cerâmica e para emissões atmosféricas, banco de dados Ecoinvent 3.5.
Preparação da argila	Quantidade de combustível utilizado por trator para a preparação da argila fornecidos pela indústria cerâmica e para emissões atmosféricas foi utilizado o banco de dados Ecoinvent 3.5.
Modelagem (laminação, extrusão e corte)	Dados de consumo de energia elétrica utilizados pela fábrica foram fornecidos pela própria empresa.
Transporte de combustível para secagem	Quilometragem e número de viagens fornecidos pela indústria cerâmica e para emissões atmosféricas, banco de dados <i>Ecoinvent</i> 3.5.
E2	Quantidade de matéria-prima utilizada como combustível para secagem fornecida pela indústria cerâmica. As emissões atmosféricas foram provenientes da base de dados <i>Ecoinvent</i> 3.5.
Secagem	
Transporte de combustível para queima	Quilometragem e número de viagens fornecidos pela indústria cerâmica e para emissões atmosféricas, banco de dados <i>Ecoinvent</i> 3.5.
Queima	Quantidade de matéria-prima utilizada como combustível para queima fornecida pela indústria cerâmica. As emissões atmosféricas foram provenientes da base de dados <i>Ecoinvent</i> 3.5.

Na fase correspondente à extração da argila, definida como etapa E1 do processo produtivo, inclui-se dados sobre combustível utilizado para extração e transporte da matéria-prima até a olaria, onde são produzidas as telhas cerâmicas. Os dados relativos aos combustíveis utilizados foram obtidos por meio de questionários aplicados dentro da empresa. As emissões atmosféricas associadas a estas etapas foram obtidas através da base de dados *Ecoinvent 3.5*.

A etapa E2 compreende a fabricação do produto, responsável pela fase onde se concentram as maiores quantidades de entradas e saídas quantificadas. Inclui diversos materiais e fontes de energia, todos quantificados com dados fornecidos pela empresa. Na preparação da massa cerâmica, utilizam-se argila e água como matéria-prima. No Cenário 01, a fase de secagem e queima utiliza lenha proveniente de espécies locais, como o cajueiro, além de energia elétrica da rede local. No Cenário 02, a lenha é substituída por resíduos de fibras de algodão recicladas da indústria têxtil, enquanto a energia elétrica é fornecida por placas fotovoltaicas instaladas na empresa. Quanto aos *outputs*, as emissões atmosféricas foram obtidas da base de dados *Ecoinvent 3.5*.

A finalização do processo de produção das telhas cerâmicas envolve a separação e contabilização das peças aptas para a venda e gestão das perdas, que são armazenadas para comercialização.

4.4 Avaliação das melhorias aplicadas e impactos ambientais

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) utiliza os resultados do inventário para transformá-los em pontuações de impacto ambiental, contribuindo para avaliar as melhorias potenciais e identificar pontos críticos do ciclo de vida. A AICV inclui etapas como seleção das categorias de impacto, classificação/caracterização, normalização e ponderação (ABNT, 2009). No *software* SimaPro, para esta avaliação quantitativa foi utilizado o método CML *baseline* V3.10. Neste método “base” estão disponíveis até 10 categorias de impacto, sendo definido pela abordagem de ponto médio no qual está inserida a etapa de normalização, não havendo ponderação (PRÉ, 2020).

Neste método, foram selecionadas seis categorias de impacto para o estudo, estas categorias do método CML-IA escolhidas são avaliadas em trabalhos envolvendo a avaliação

de ciclo de vida de materiais de construção, como as telhas e revestimentos cerâmicos (QUINTEIRO *et al.*, 2022; TÜRKMEN; DUHBACĐ; ÖZBILEN, 2021), o que facilita possíveis comparações e observações entre pesquisas e estudos realizados nesta área de trabalho, sendo elas (PRÉ, 2020):

- Elementos de esgotamento abiótico (EA) - é medido o consumo de recursos minerais e fósseis que são não-renováveis (abióticos), indicando a quantidade de recursos minerais e fósseis esgotados devido à produção da telha cerâmica por meio da unidade quilograma equivalente de antimônio (kg equivalentes de antimônio/kg extração) como referência, com base nas reservas de concentração e na taxa de desacumulação. O escopo geográfico deste indicador é em escala global.
- Acidificação (A) - é medido a contribuição para a acidificação do solo e da água, indicando a quantidade de substâncias que podem liberar íons de hidrogênio (H^+), causando a diminuição do pH em ecossistemas. O potencial de acidificação é expresso utilizando quilograma equivalente de dióxido de enxofre (SO_2) por quilograma de emissão, como referência;
- Eutrofização (E) - é avaliado o enriquecimento de nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) em corpos d'água, indicando a quantidade de nutrientes liberados que podem levar ao crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, causando desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos e utilizando quilograma de fosfato equivalente (PO_4) por quilograma de emissão como referência;
- Aquecimento global (AG) - avalia a contribuição da emissão de gases do efeito estufa para o ar, que podem contribuir para as mudanças climáticas. O seu modelo de caracterização desenvolvido pelo IPCC é utilizado para o desenvolvimento de fatores de caracterização, onde os fatores são expressos como Potencial de Aquecimento Global para um horizonte de tempo de 100 anos “GWP100”, utilizando quilograma de dióxido de carbono (CO_2) por quilograma de emissão, em um escopo geográfico com escala global.
- Oxidação fotoquímica (OF) - é avaliado a formação de ozônio fotoquímico, representando a quantidade de compostos que contribuem para a formação de ozônio na baixa atmosfera, que pode causar problemas respiratórios e danos à vegetação, no qual é utilizado quilograma de etileno (C_2H_4) por quilograma de emissão;
- Toxicidade humana (TH) - é medido os impactos potenciais na saúde humana devido à exposição a substâncias tóxicas, indicando a quantidade de substâncias tóxicas

liberadas no ambiente que podem afetar a saúde humana. Para cada substância tóxica os Potenciais de Toxicidade Humana (PTH) são definidos usando quilograma equivalente de 1,4-diclorobenzeno como referência.

É importante destacar que os indicadores de categoria de impacto ambiental “basilares” deste método precisam ser lineares. Essa linearidade significa que eles são independentes da magnitude da intervenção ambiental ocorrida, contribuindo para que desta forma a estrutura geral da ACV não seja alterada, seguindo a Equação 1 para quantificação de cada categoria de impacto ambiental selecionada:

$$\text{Cat. de impacto} = i \sum (M_i \times \text{fat. de caract.}_i) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- Cat. de impacto: indicador de categoria de impacto ambiental selecionado;
- M_i : massa do poluente (i);
- Fat. de caract._i : fator de caracterização do poluente utilizado (i).

No âmbito das melhorias ambientais, a avaliação das matrizes energéticas considerou a lenha de espécies nativas locais mistas e os resíduos da fibra de algodão reciclada como novos produtos no *software*, no qual os dados inseridos estão apresentados na Tabela 2. Desta forma, foi permitida a comparação dos dois processos na categoria de impacto de Aquecimento Global, fundamental para a indústria cerâmica. Os processos analisados e respectivos nomes no *software* SimaPro estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 — Parâmetros para a criação dos produtos lenha e fibra de algodão no SimaPro

Parâmetros conhecidos		Lenha mistura de espécies	Fibra de algodão
Entradas	Dióxido de carbono, no ar (kg)	1,81	2,15
	Energia, valor calorífico bruto, em biomassa (MJ)	12	18
Saídas	Emissão de dióxido de carbono (kg CO ₂ eq.)	1,95	1,50

Fonte: Ecoinvent (2015); Vale *et al.*, 2000.

Tabela 3 — Processos analisados e respectivas nomenclaturas no *software* SimaPro

Processos	Nomenclatura
Argila extraída	<i>Clay {CH} clay pit operation/ Cut-off, U</i>
Transporte de argila	<i>Transport, freight lorry 16-32 metric ton, EURO 1 {BR}/ Cut-off, U</i>
Escavação - extração de argila	<i>Excavation, hydraulic digger {RoW} excavation/ Cut-off, U</i>
Mistura feita com escavadeira	<i>Excavation, skid-steer loader {RoW} excavation/Cut-off, U</i>
Transporte de resíduo da fibra de algodão reciclada para queima	<i>Transport, freight lorry 16-32 metric ton, EURO 1 {BR}/ Cut-off, U</i>
Água de poço utilizada com bomba d'água	<i>Water pump operation, electric {BR}/ Cut-off, U</i>
Transporte de lenha para a fase de secagem	<i>Transport, freight lorry 16-32 metric ton, EURO 1 {BR}/ Cut-off, U</i>
Lenha para secagem	<i>Cleft timber – Russas</i>
Transporte de lenha para a fase de queima	<i>Transport, freight lorry 16-32 metric ton, EURO 1 {BR}/ Cut-off, U</i>
Lenha para queima	<i>cleft timber – Russas</i>
Transporte de resíduo da fibra de algodão reciclada para queima	<i>Transport, freight lorry 16-32 metric ton, EURO 1 {BR}/ Cut-off, U</i>
Resíduo da fibra de algodão têxtil reciclada para queima	<i>Fibre cotton – Russas</i>
Fornecimento de energia elétrica – média tensão – Região Nordeste	<i>Electricity, medium voltage {BR-north-eastern-grid}/ Cut-off, U</i>
Fornecimento de energia elétrica - alta tensão - placas fotovoltaicas	<i>Electricity, high voltage {RoW} electricity production, solar tower power plant, 20 MW / Cut-off, U</i>

Fonte: Autora (2024).

Para a avaliação estatística das melhorias aplicadas através da simulação Monte Carlo no SimaPro é necessário selecionar a etapa do produto ou processo que será avaliado. O passo a passo realizado para esta simulação está apresentado no APÊNDICE D. Após esta seleção, os seguintes parâmetros foram especificados:

- O método de avaliação de impacto utilizado - CML baseline V3.10/ EU25;
- O critério para parada dos cálculos - podem ser escolhidos entre o número fixo de execuções ou um fator de parada. No número fixo de execuções é definido um número fixo de execuções de amostragem, já no fator de parada é executado uma série de execuções até que o fator de parada seja alcançado. Este fator pode ser baseado em qualquer valor, como um resultado de pontuação única ou a quantidade de uma emissão específica (Mark Goedkoop *et al.*, 2014). Neste trabalho foi utilizado o critério de número fixo de execuções, no qual foi escolhido a realização de 750 rodadas de séries, conforme o estudo realizado por Quantis (2011) para a simulação de Monte Carlo na ACV de telhas de cerâmica e concreto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Quantificação dos impactos ambientais nos cenários de estudo

Os dados de entrada considerados para o estudo do sistema estão apresentados na Tabela 4 e as equações utilizadas para a obtenção desses valores no APÊNDICE C. Eles foram formulados a partir da média dos dados fornecidos durante 12 meses pela empresa para a produção correspondente a 0,5 m² de telhas cerâmicas, que correspondem a 16 unidades do produto, no ano de 2023.

Tabela 4 — Processos e dados para a produção de 0,5 m² de telhas cerâmicas - Cenários 01 e 02

Processos	Cenário 01	Cenário 02
P1 (kg)	Argila extraída - 29,6	
P2 (T.km)	Transporte de argila - 4,038	
P3 (m³)	Escavação - extração de argila - 0,014	
P4 (m³)	Mistura feita com escavadeira - 0,013	
P5 (MJ)	Água de poço utilizada com bomba d'água - 0,0005	
P6 (T.km)	Transporte de lenha para a fase de secagem - 0,0068	
P7 (kg)	Lenha para secagem - 0,765	
P8 (T.km)	Transporte de lenha para a fase de queima - 0,496	Transporte de resíduo da fibra de algodão reciclada para queima - 2,142
P9 (kg)	Lenha para queima - 6,884	Resíduo da fibra de algodão têxtil reciclada para queima - 1,622
P10 (Kwh)	Fornecimento de energia elétrica – média tensão – Região Nordeste - 0,387	Fornecimento de energia elétrica - alta tensão - placas fotovoltaicas - 0,387

Fonte: Autora (2024).

Os valores de entradas apresentados permaneceram os mesmos para os processos que não sofreram alterações nas modificações realizadas no Cenário 02. O processo de queima (P9) teve alterações nas quantidades de material energético fornecido ao se trocar a lenha por resíduo de fibra de algodão juntamente dos seus transportes (P8) que possuem localizações e consequentes distâncias diferentes. Em relação a fonte de energia elétrica (P10), o valor consumido pela empresa no seu processo produtivo permaneceu o mesmo, sendo então alterado no *software* apenas o tipo de fonte utilizada para energia solar.

O resultado da simulação no *software* SimaPro para quantificação geral das categorias ambientais nos cenários de estudo estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 — Quantificação geral das categorias de impacto do estudo no *software* SimaPro

Categorias de impacto	Cenário 01	Cenário 02
Elementos de esgotamento abiótico (kg Sb eq.)	1,04x10 ⁻⁵	1,13x10 ⁻⁵
Aquecimento global (kg CO ₂ eq.)	16,1	5,06
Toxicidade Humana (kg 1,4-DB eq.)	8,45	9,58
Oxidação fotoquímica (kg C ₂ H ₄ eq.)	2,82x10 ⁻⁴	3,18x10 ⁻⁴
Acidificação (kg SO ₂ eq.)	4,7x10 ⁻³	4,82x10 ⁻³
Eutrofização (kg PO ₄ eq.)	1,48x10 ⁻³	1,56x10 ⁻³

Fonte:

Autora

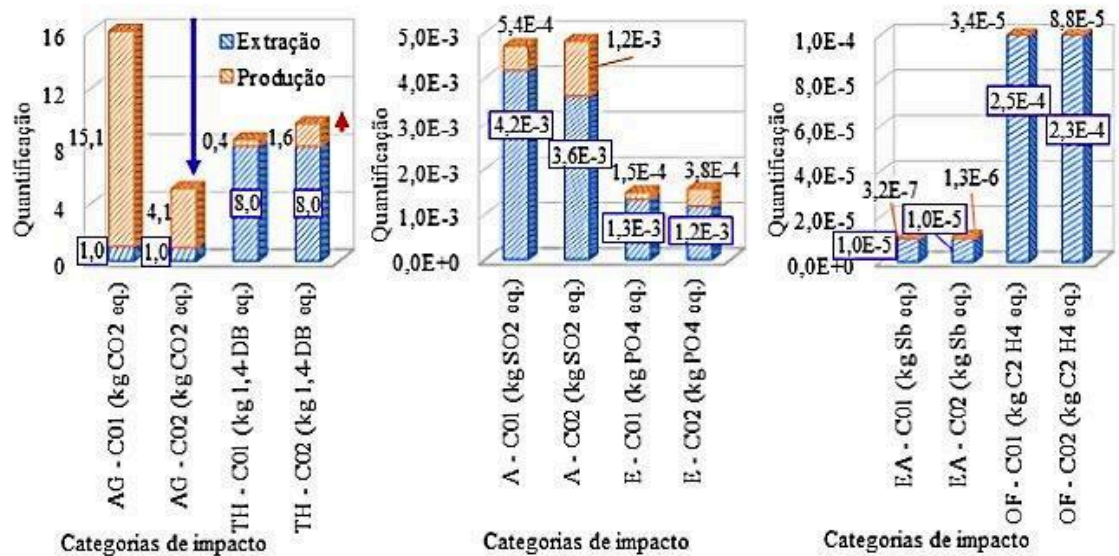
(2024).

Nota-se ao comparar os Cenários 01 e 02 que ao modificar as matrizes energéticas para a queima, a maioria das categorias de impacto obtiveram um leve aumento em suas quantificações, diferentemente do que ocorreu para o aquecimento global, onde ocorreu sua diminuição mais acentuada em relação ao valor anterior. Observa-se que apesar de haver uma modificação e diminuição da quantidade de matrizes utilizadas, o aumento da distância

percorrida pelo transporte para entregá-las elevou-se de 0,498 T.Km para 2,142 T.Km, contribuindo em um leve aumento dos processos restantes, como apresentado na Tabela 5.

Para uma melhor avaliação dos processos responsáveis pelos resultados obtidos nas categorias de impacto, a Figura 21 apresenta a quantificação das categorias de impacto nas etapas do processo produtivo da telha cerâmica nos Cenários 01 e 02.

Figura 21 — Quantificação das categorias de impacto ambiental nos Cenários 01 e 02



Fonte: Autora (2024).

Ao analisar a quantificação das categorias de impacto nas etapas de extração e produção de telhas cerâmicas em ambos os cenários, observa-se que a etapa de extração se destaca na maioria dos parâmetros selecionados, enquanto a etapa de produção predomina na contribuição para o aquecimento global (AG). A elevada contribuição da etapa de extração para Toxicidade Humana, Acidificação, Eutrofização, Esgotamento abiótico e Oxidação Fotoquímica (TH, A, E, EA e OF) deve-se à questão da mineração, no qual há o desmatamento, a movimentação de partículas de solo e sua retirada como matéria-prima, além da emissão de poeira e material particulado para a atmosfera decorrentes do seu transporte.

Já na etapa de produção os aumentos na TH, A, E e OF ocorrem devido principalmente à distância maior percorrida para o transporte da fibra até a fábrica e a modificação para energia solar por necessitar de desmatamento de grandes áreas para a sua

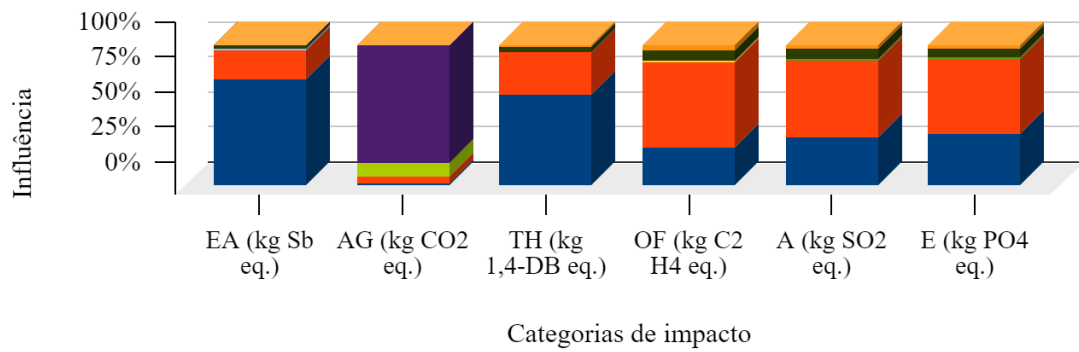
instalação, além da mineração intensiva de metais para a fabricação de suas placas fotovoltaicas, práticas que também causam danos à saúde humana. Por outro lado, a maior contribuição para o aquecimento global durante a etapa de produção é atribuída à queima intensiva de materiais para a geração de energia e o seu transporte por caminhões, ambos contribuindo para as emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

5.2 Cenários antes e após a adoção das melhorias ambientais

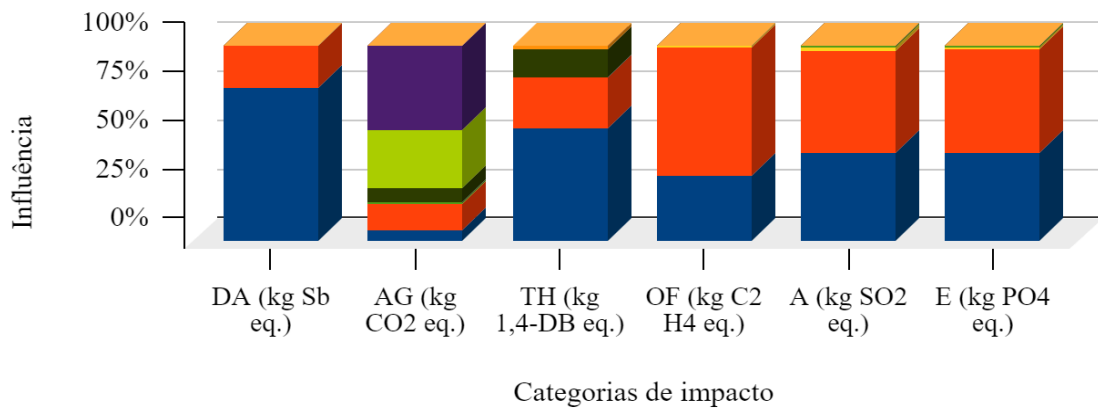
5.2.1 Comparação dos impactos ambientais nos cenários 01 e 02

Na fase de avaliação de impacto, os resultados inventariados são traduzidos em categorias de impacto através da aplicação de fatores de caracterização aos processos envolvidos. Nesse contexto, a relação causa-efeito é avaliada. As Figuras 22a e 22b apresentam os percentuais de influência de cada etapa do processo nas categorias de impacto selecionadas, correspondentes aos Cenários 01 e 02, respectivamente.

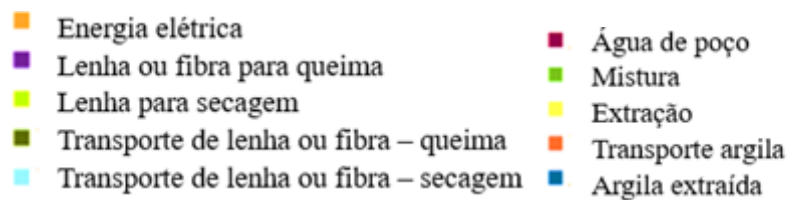
Figura 22 — Simulação no *software* SimaPro da influência dos processos de produção das telhas cerâmicas para as categorias de impacto selecionadas



a) Cenário 01



b) Cenário 02



Fonte: Autora (2024).

Considerando os resultados apresentados na Figura 22a, que ilustra o percentual de influência dos processos estudados no Cenário 01, observa-se que o uso da lenha para queima (P9), bem como a quantidade de argila extraída (P1) e o seu transporte para a fábrica (P2), resultaram em uma maior contribuição nas categorias de impacto ambiental. Estima-se que este uso da lenha contribuiu com aproximadamente 83,2% para o impacto no aquecimento global (AG), seguido da contribuição da argila extraída com 75,6% na categoria esgotamento abiótico (EA) e 64,9% de influência na toxicidade humana (TH). O transporte da argila foi responsável por cerca de 60,7%.

Apesar das jazidas de matéria-prima estarem localizadas cerca de 4,5 km do seu local

de destino, a grande quantidade de argila extraída (P1) para a indústria cerâmica exige muitas viagens de caminhões de médio porte, aumentando a quilometragem percorrida e, conseqüentemente, o uso de combustíveis fósseis e emissões atmosféricas. A fase da queima, essencial para a formação das estruturas cristalinas finais do produto, demanda grande quantidade de lenha como matriz energética, justificada pela quantidade de telhas produzidas, que atingiu uma média mensal de 600657 unidades.

Os processos restantes resultaram em porcentuais de impacto menos significativos. A energia elétrica consumida na indústria (P10) contribuiu com 3,44% para o impacto de oxidação fotoquímica e 2,65% na acidificação. O processo de secagem em estufa (P7) representou cerca de 9,25% da influência no aquecimento global, devido ao menor consumo de lenha em comparação com a queima. A quantidade de água extraída do poço (P5), juntamente com o combustível necessário para escavação da argila (P3) e o preparo e mistura da matéria-prima (P4), tiveram pequena influência neste processo.

Na Figura 22b, analisando o Cenário 02, os processos de quantificação da argila (P1), seu transporte para a fábrica (P2) e quantificação da fibra de algodão reciclada para queima (P9) foram os maiores influenciadores nas categorias de impacto ambiental. O P1 contribuiu com 69,5% do esgotamento abiótico (EA) e 57,3% para a toxicidade humana (TH), enquanto o transporte (P2) teve 48,1% de influência na oxidação fotoquímica (OF). Na categoria de aquecimento global, destacou-se a utilização do resíduo de fibra de algodão para queima (P9) com 43,3%. Estes resultados refletem a quantidade de cargas para transportar a argila e o resíduo de fibra de algodão, contribuindo para a emissão de dióxido de carbono. A lenha utilizada na secagem também contribuiu com cerca de 29,5% para o AG.

Os processos de mistura de argila (P4), uso da lenha para a secagem (P8), combustível para escavação das jazidas (P3), energia elétrica fornecida por placas fotovoltaicas (P10) e água de poço retirada (P5) tiveram influência menor nas categorias de impacto ambiental.

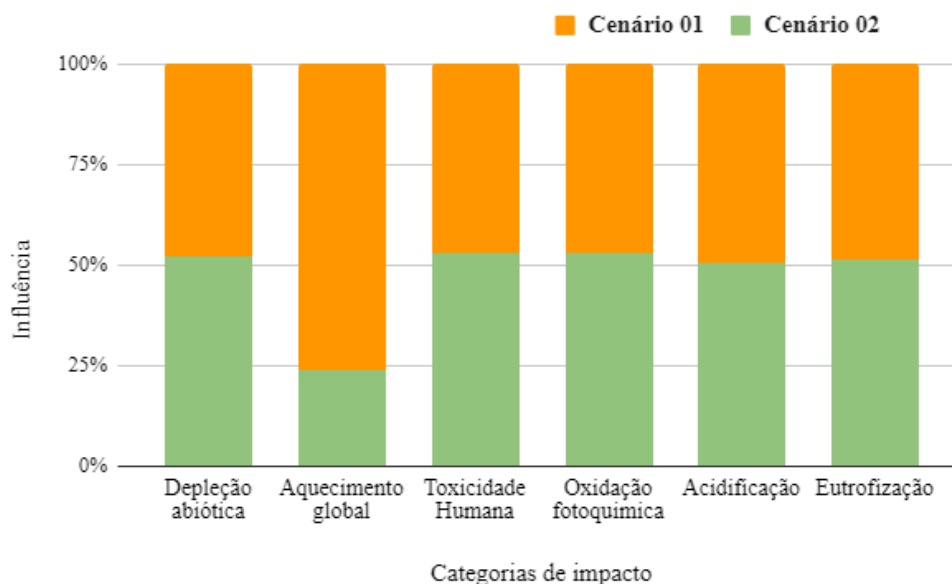
Comparando os consumos de energia elétrica nos Cenários 01 e 02, apesar de um aumento na sua contribuição para a TH (2,27%) que pode ser causado pelo desmatamento causado nas áreas para a implementação das placas fotovoltaicas, houve uma diminuição de 3,44% para 1,19% na OF e de 2,65% para 1,18% na acidificação. Essa redução pode ser justificada pelo aumento da influência dos outros processos no Cenário 02, em que se modificou a fonte da matriz energética para o resíduo da fibra de algodão, havendo uma diminuição significativa da quantidade utilizada, além da mudança para a fonte de energia solar que possui menos impactos ambientais em geral, se comparada com as fontes

tradicionais (SILVA *et al.*, 2021).

Em ambos os cenários, os processos de quantificação da argila e o seu transporte foram os mais influentes em praticamente todas as categorias de impactos avaliadas, seguidos pelas quantidades de materiais usados para queima e secagem na categoria de AG. A extração mineral causa vários tipos de danos ambientais, requer maquinário significativo e caminhões para o transporte, contribuindo para ambas as categorias de impacto. O impacto do aquecimento global está diretamente relacionado à queima de matrizes energéticas, transporte em veículos a diesel, desmatamento e atividades de mineração, justificando a contribuição da produção das telhas cerâmicas para as emissões de CO₂, acidificação e eutrofização. Devido às cargas significativas de material particulado, há também riscos à saúde associados à toxicidade humana (TH).

Desta forma, a Figura 23 compara as porcentagens de influência resultantes das modificações inseridas no sistema. As contribuições mais significativas nos cenários estão relacionadas à categoria de Aquecimento Global, onde a modificação da fonte de energia reduziu a influência para menos de 25%, enquanto os outros aspectos ambientais mantiveram praticamente as porcentagens de influência após a modificação do cenário.

Figura 23 — Influência dos Cenários 01 e 02 nas categorias de impacto



Fonte: Autora (2024).

A utilização de lenha como matriz energética no semiárido brasileiro assume proporções preocupantes, pois, devido às intempéries ambientais, como quadras chuvosas irregulares, o bioma tem baixa capacidade de sua recuperação (Oliveira; Montenegro, 2015),

juntamente da destruição intensa das matas nativas que contribuem para o processo de desertificação (Moura, 2000). Com a significativa quantidade de energia necessária para secagem, queima ou calcinação dos materiais na indústria cerâmica, a adoção de medidas voltadas para reduzir os impactos ambientais é importante.

O resíduo da fibra de algodão têxtil reciclada foi utilizado como substituto da lenha e conforme a Figura 4, a modificação do insumo utilizado na fase de queima reduziu as porcentagens de influência de 83,2 a 43,3% no AG. Assim, ao utilizar um resíduo como fonte de energia, evita-se a extração de materiais naturais, o consumo de pesticidas que seriam usados, a energia elétrica no processamento de combustíveis fósseis no transporte e a necessidade de disposição em aterro sanitário (Duijn, 2020).

A produção de tecidos de algodão, assim como a utilização da lenha na indústria cerâmica, também envolve várias alterações na natureza, sociedade e economia (Calvão *et al.*, 2013). O descarte dos resíduos têxteis, é um problema ambiental considerável para a indústria têxtil, no qual as suas propriedades potencialmente tóxicas impedem o envio ao lixo comum. Na Europa, esta indústria gera cerca de 4700 toneladas de resíduos têxteis anualmente, com menos de 1% sendo reaproveitado (Duijn, 2020). O Brasil foi considerado o quarto maior produtor de algodão e segundo maior exportador (CONAB, 2019) e em 2017 produziu aproximadamente 2 milhões de toneladas de algodão, gerando cerca de US\$13 bilhões, tornando-o décimo maior produtor mundial de têxteis (Mendes Junior, 2017). Essas informações afirmam e reforçam a necessidade de fontes que melhor reutilizem ou destinem de forma correta os resíduos de fibra de algodão.

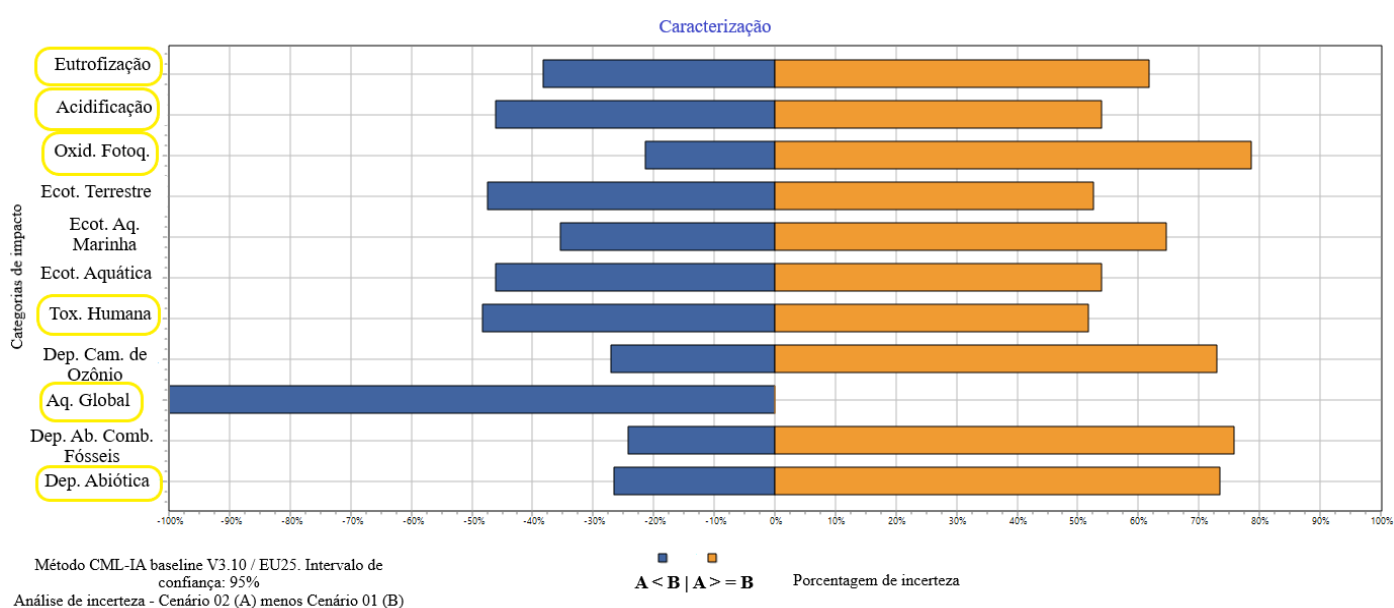
5.2.2 Avaliação da incerteza por Monte Carlo

A análise de Monte Carlo pode ser considerada uma forma numérica de processar dados de incerteza no qual se estabelece uma faixa de incerteza nos resultados calculados. Para este trabalho, além dos dados coletados para a sua construção, uma parte significativa dos fluxos inventariados vêm do banco de dados *Ecoinvent*. Nesta avaliação de incerteza, a distribuição lognormal caracterizada por um desvio padrão ou um intervalo é utilizada para representar a variabilidade dos dados no método selecionado. Ela é considerada uma das mais importantes dentro de um estudo de ACV, podendo ser considerada padrão (Mark Goedkoop *et al.*, 2014).

Desta forma, para execução da simulação Monte Carlo no SimaPro foi escolhida a etapa do produto ou processo que foi avaliado, com o passo a passo realizado para esta simulação apresentado no APÊNDICE D.

A Figura 24 apresenta o resultado da simulação para a avaliação de impacto dos cenários 01 e 02 - caracterização em formato gráfico. Este tipo de simulação realizada efetua a subtração dos dois sistemas que estão sendo comparados, no qual os resultados indicam a probabilidade de os dados simulados de uma opção gerarem mais danos do que o da outra.

Figura 24 — Análise de incerteza do Cenário 02 (A) menos o Cenário 01 (B) com intervalo de confiança de 95%



Fonte: Autora (2024).

Juntamente da Figura 24, os valores das probabilidades de que o Cenário 01, em que se utilizou lenha como matriz energética e energia elétrica fornecida pela distribuidora local, tenha contribuições maiores nas categorias de impacto escolhidas que o Cenário 02, onde utilizou-se resíduo de fibra de algodão reciclada como matriz energética para queima e energia solar no seu processo produtivo, está representada na Tabela 6.

Tabela 6 — Resultados da Simulação Monte Carlo na comparação dos cenários

Categorias de impacto	C01 >= C02
Elementos de esgotamento abiótico	23,5%
Aquecimento global	100%
Toxicidade Humana	47,2%
Oxidação fotoquímica	18,1%
Acidificação	42,4%
Eutrofização	36,7%

Fonte: Autora (2024).

Diante dos cenários apresentados, observa-se o destaque para a categoria de Aquecimento global que apresenta a porcentagem de 100% relacionada a ter os maiores valores de impacto no cenário 01, enfatizando os benefícios da troca de matriz energética utilizada para queima, que pode ser considerada um dos principais *hotspots* nestes tipos de indústria. Além disso, as categorias de impacto restantes apresentaram porcentagens consideradas não significativas devido os valores serem menores que 50%, o que provavelmente relata possibilidades de serem maiores no cenário 02, apesar de não apresentarem uma grande diferença, como foi apresentado na Tabela 5 com a quantificação geral dos impactos ambientais nos cenários de estudo.

Gensch e Liu (2008), consideraram o limite do sistema do “berço ao portão”, demonstrando que a fase de produção das telhas cerâmicas com as emissões locais, produção de combustível e consumo de eletricidade foram uma das mais relevantes das categorias de impacto analisadas, com contribuições médias entre 63 e 95%. Da mesma forma, no estudo de Quinteiro *et al.* (2022) com o limite do sistema desde a fase de produção até o estágio de fim

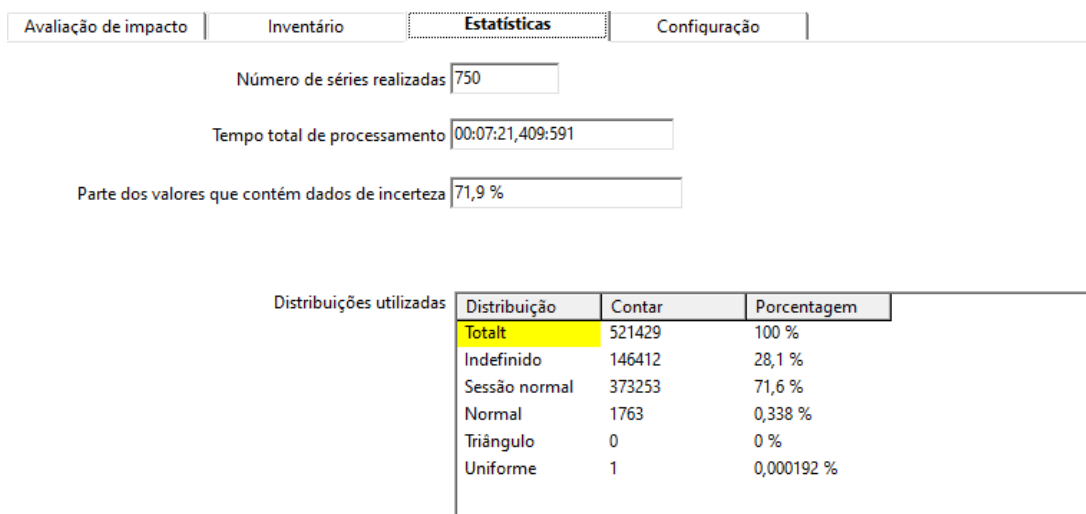
de vida, os autores mostraram que as emissões no local durante a fabricação foram o principal ponto crítico nos cenários para aquecimento global, eutrofização e material particulado, além da importância da fase de produção com a contribuição de 50 a 95% e 72 a 96% do impacto total para o estudo de caso das duas cerâmicas portuguesas analisadas, respectivamente.

Com relação aos outros parâmetros, os valores simulados apresentaram probabilidade de serem maiores no Cenário 01 abaixo de 50%, com destaque para os Elementos de esgotamento abiótico (73,5%) e Oxidação fotoquímica (78,7%). Estes resultados enfatizam os que foram obtidos na Tabela 5 com relação a quantificação geral das categorias de impacto, no qual apesar dos valores da maioria dos parâmetros serem maiores para o Cenário 02, a diferença entre eles é considerada pequena, diferentemente do que ocorreu com o aquecimento global, em que o seu valor diminuiu cerca de três vezes ao apresentado no cenário anterior.

Os aumentos nas categorias de EA, OF e TH podem ocorrer principalmente devido a distância maior percorrida para o transporte da fibra, no qual é localizada a 27,1 km da fábrica e anteriormente a extração de lenha situava-se a cerca de 4,5 km, além da modificação do fornecimento de energia elétrica para energia solar, sendo necessário o desmatamento de grandes áreas para a sua instalação, além da mineração intensiva de metais para a fabricação de suas placas fotovoltaicas, contribuindo também para danos à saúde humana.

Já a Figura 25 apresenta a parte estatística do resultado obtido para a Simulação Monte Carlo. Esta análise ocorreu em um tempo total de processamento de aproximadamente 7 minutos, utilizando os parâmetros escolhidos anteriormente. Obteve-se que cerca de 71,9% do modelo de dados foi representado pela distribuição em variabilidade, resultado semelhante ao apresentado no estudo de Quantis (2011) sobre a análise comparativa da ACV de telhas de cerâmica e concreto, com os valores de 70,4% para o seu modelo de dados. Desta forma, apresenta-se um percentual da variabilidade existente nesses tipos de dados e consequente cuidado necessário com a qualidade dos mesmos e de suas informações. Mais detalhes da avaliação de incerteza por Monte Carlo estão apresentados no APÊNDICE E.

Figura 25 — Resultado estatístico da Simulação Monte Carlo



Fonte: Autora (2024).

5.3 Identificação das contribuições para metas dos ODS

Segundo o UNICEF (2023), os ODS são 17 objetivos que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados pelas pessoas no Brasil e no mundo. Assim, a ACV constitui uma ferramenta importante para melhor monitorar os ciclos de produção e identificar alternativas entre processos, que pode ser usada para comparar potenciais impactos ambientais entre diferentes designs de produtos e processos, fornecendo assim alternativas possivelmente mais sustentáveis (Takeda, 2008).

Com este estudo relacionado ao processo produtivo de telhas cerâmicas e aos ODS e metas propostas pelas Nações Unidas para o cumprimento da Agenda 2030, observou-se a contribuição para objetivos propostos relacionados à: saúde e ao bem-estar (n.º 3), água potável e saneamento (n.º 6), indústria, inovação e infraestruturas (n.º 9), cidades e comunidades sustentáveis (n.º 11), consumo e produção sustentáveis (n.º 12), ação contra a mudança global do clima (n.º 13), ação contra as alterações climáticas globais e parcerias e meios de implementação (n.º 17).

O objetivo n.º 3, trata sobre a questão de assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos. A meta 3.9 visa reduzir substancialmente o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo, no qual a ACV das telhas cerâmicas contribui com um melhor controle e diagnóstico dos tipos de

poluição, principalmente a poluição do ar, devido ser um tipo de atividade que se destaca pela emissão de materiais particulados durante o processo de queima. Ao ser analisado o processo de extração e produção das telhas, demonstrou-se em várias categorias de impacto a influência do material particulado proveniente da matéria-prima extraída e decorrente da sua etapa de queima, no qual tiveram destaques em suas contribuições para o aquecimento global e toxicidade humana.

O objetivo n.º 6, visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água juntamente do saneamento para todos. Com a meta 6.3 e 6.4, procura-se melhorar a qualidade da água e também o aumento substancial da sua reciclagem e reutilização segura no mundo até 2030, além de aumentar substancialmente o seu uso em todos os setores, assegurando retiradas sustentáveis. Essas medidas enfatizam a necessidade de se ter o controle eficiente e uma melhor administração dos volumes de água gastos durante a fase de mistura e preparação da massa, no qual apesar de terem sido os impactos menos significativos, são os processos que envolvem os maiores volumes de água gastos e podem ser avaliados na fase de AICV.

A construção de infraestruturas resilientes, promovendo a industrialização inclusiva, sustentável e a inovação, estão presentes no objetivo de n.º 9, em que as metas 9.2, 9.4 e 9.5, visam promover a industrialização inclusiva e sustentável, modernizando as infraestruturas para torná-las sustentáveis e resilientes, melhorando as capacidades tecnológicas de setores industriais principalmente nos países em desenvolvimento. A indústria cerâmica em questão participa destes cenários em que o ICV possibilita a identificação das áreas que necessitam de melhorias na questão da sustentabilidade e modernização, e a discussão e conhecimento sobre soluções acerca dessas questões, como ocorre com a quantificação do consumo dos tipos de energia em cada processo e consequente avaliação de como melhorá-los. A fase de queima possui bastante destaque no consumo de material combustível, no qual a indústria utiliza de um forno do tipo CEDAN, que reaproveita até 80 % do calor gerado na queima, e reduz em 65% o uso de lenha e emissão de poluentes (Dantas, 2008).

Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis faz parte do objetivo n.º 11. A meta 11.6, é relacionada com a redução do impacto negativo per capita das cidades, enfatizando entre outros pontos, a atenção necessária para a qualidade do ar, onde novamente os materiais particulados emitidos pelo processamento das telhas cerâmicas pode contribuir para a modificação da qualidade do ar e a fase do ICV trará dados quantitativos para a representatividade e tomada de decisão sobre essa questão.

Já o objetivo n.º 12, visa garantir os padrões de consumo e de produção sustentáveis. Ao avaliar o ciclo de vida das telhas cerâmicas e comparar os impactos antes e após a adoção de medidas sustentáveis, promovem-se práticas de produção e consumo mais sustentáveis, o que faz parte das ações requeridas nas metas 12.2, visando alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, a meta 12.5, em reduzir significativamente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, ambas até o ano de 2030, e as metas 12.6 e 12.a, em incentivar as empresas a adotarem práticas sustentáveis e integrarem informações de sustentabilidade nos seus ciclo de relatórios, apoiando também os países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas, contribuindo para padrões mais sustentáveis de produção e consumo.

Por fim, o objetivo de n.º 13 é relacionado com a adoção de medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus consequentes impactos e o objetivo de n.º 17 em reforçar os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável. Ao identificar e comparar os impactos ambientais, especialmente através do Impacto de Ciclo de Vida (ICV), há contribuição para a compreensão e mitigação dos efeitos da produção industrial no clima. A Meta 13.3 enfatiza a necessidade da melhoria na educação, sensibilização e capacidades humanas em relação à mitigação das mudanças climáticas, no qual a meta 17.6 é voltada para a aprimoração da cooperação Norte-Sul, Sul-Sul e triangular regional e internacional visando aumentar o apoio internacional aos países em desenvolvimento, aumentando a capacidade nacional para implementar práticas e programas sustentáveis. Colaborar com a complementação da base de dados disponível e contribuir para a elaboração do ICV específico para indústrias cerâmicas, mostra um esforço colaborativo para estes objetivos.

6 CONCLUSÕES

Ao ser construído o inventário do Ciclo de Vida (ACV) da telha colonial produzida por uma indústria cerâmica do Nordeste brasileiro foi possível comparar os cenários antes e depois da aplicação de medidas sustentáveis no qual houve melhoria no desempenho ambiental do Cenário 02 com a substituição da lenha como combustível para o resíduo de fibra de algodão reciclado significativamente na categoria de aquecimento global com as reduções das porcentagens de influência de 83,2 a 43,3% no AG, e a modificação da fonte de energia elétrica para energia solar com a diminuição de 3,44% para 1,19% na OF e de 2,65% para 1,18% na acidificação. Além disso, o estudo abrangeu o alcance de sete Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) contendo o total de 13 metas voltadas para os objetivos propostos para a Agenda 2030.

Com a quantificação dos dados através da utilização do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), os impactos ambientais globais mais significativos foram observados tanto nas etapas de extração de argila (E1), como de produção (E2), no qual as categorias de impacto selecionadas obtiveram os seguintes valores gerais para o Cenário 01 e 02, respectivamente: Elementos de esgotamento abiótico (kg Sb eq.) - 0,0000104 e 0,0000113; Acidificação (kg SO₂ eq.) - 0,0047 e 0,0048; Eutrofização (kg PO₄ eq.) - 0,00148 e 0,00156; Aquecimento Global (kg CO₂ eq.) - 16,1 e 5,06; Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq.) - 8,45 e 9,58 e Oxidação fotoquímica (kg C₂H₄ eq) - 0,000282 e 0,000318.

Ao comparar os cenários ambientais antes e após as melhorias ambientais, destacou-se no Cenário 01 a categoria do aquecimento global (83,2%) seguida da argila extraída como matéria-prima para a categoria esgotamento abiótico (75,6%) e Toxicidade Humana (64,9%). Já no Cenário 02, a maior contribuição foi para a argila extraída para a categoria esgotamento abiótico (69,5%) e Toxicidade Humana (57,9%), seguida de seu transporte para oxidação fotoquímica (48,1%), processos de extração de matéria-prima (P1), transporte (P2) e combustíveis usados na queima (P9) na categoria de aquecimento global.

Em relação aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) o ICV das telhas cerâmicas contribui para um melhor controle e diagnóstico dos tipos de poluição, dos processos que envolvem os maiores volumes de água gastos, a identificação das áreas que necessitam de melhorias na questão da sustentabilidade e modernização, o conhecimento sobre soluções acerca dessas questões, a quantificação do consumo dos tipos de energia em cada processo e consequente avaliação de como melhorá-los, no qual ao comparar os

impactos antes e após a adoção de medidas sustentáveis, promovem-se práticas de produção e consumo mais conscientes, além da compreensão e mitigação dos efeitos da produção industrial no clima. Colaborar com a complementação da base de dados disponível e contribuir para a elaboração do ICV específico para indústrias cerâmicas, mostra um esforço colaborativo para a aprimoração internacional visando aumentar o apoio aos países em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. **CERÂMICA NO BRASIL - NÚMERO DO SETOR**. Disponível em: <https://abceram.org.br/numeros-do-setor/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- ABCERAM. **INFORMAÇÕES TÉCNICAS - DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO**. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- ABCERAM. **INFORMAÇÕES TÉCNICAS - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 29 jun. 2023.
- ABCERAM. **FLUXOGRAMAS**. 2023. Disponível em: <https://abceram.org.br/fluxograma/>. Acesso em: 30 jun. 2023.
- ACV BRASIL. **SimaPro**. 2024. Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/software/simapro>. Acesso em: 02 ago. 2024.
- ANFACER (org.). **História da Cerâmica**. 2023. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/historia-da-ceramica>. Acesso em: 11 ago. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 30 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 52 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14049**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 61 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14071**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Processos de análise crítica e competências do analista: Requisitos adicionais e diretrizes para a ABNT NBR ISO 14044:2009. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 18 p.
- ADDISON, P. F. E.; BULL, J. W.; MILNER-GULLAND, E. J. Using conservation science to advance corporate biodiversity accountability. **Conservation Biology**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 307-318, 5 out. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/cobi.13190>
- AGUIAR, A. C. F.; SCARANO, F. R.; BOZELLI, R. L.; BRANCO, P. D.; CEOTTO, P.; FARJALLA, V. F.; LOYOLA, R.; SILVA, J. M. C. da. Business, biodiversity, and innovation in Brazil. **Perspectives In Ecology and Conservation**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 6-16, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2022.12.002>.

AIGBAVBOA, C.; OHIOMAH, I.; ZWANE, T. Sustainable Construction Practices: “a lazy view” of construction professionals in the south africa construction industry. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 105, p. 3003-3010, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.743>.

ARCHSOLO (org.). **Pesos específicos de materiais**. Disponível em: <https://archsolo.com.br/wp-content/uploads/2017/02/Peso-espec%C3%ADfico-materiais.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2024.

BAEK, C-Y.; TAHARA, K.; PARK, K-H. Parameter Uncertainty Analysis of the Life Cycle Inventory Database: Application to Greenhouse Gas Emissions from Brown Rice Production in IDEA. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 922, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10040922>.

BENEDETTO, L. de; KLEMEL, J. The Environmental Performance Strategy Map: an integrated lca approach to support the strategic decision-making process. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 17, n. 10, p. 900-906, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.012>.

BLUNDO, D. S.; GARCÍA-MUIÑA, F. E.; PINI, M.; VOLPI, L.; SILIGARDI, C.; FERRARI, A. M. Sustainability as source of competitive advantages in mature sectors. **Smart and Sustainable Built Environment**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 53-79, 1 abr. 2019. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/sasbe-07-2018-0038>.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 21 nov. 2023.

BOVEA, M. D.; SAURA, Ú.; FERRERO, J. L.; GINER, J. Cradle-to-gate study of red clay for use in the ceramic industry. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 439-447, 17 jun. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.06.252>.

BELOFF, B.; TANZIL, D.; LINES, M. Sustainable development performance assessment. **Environmental Progress**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 271-276, 19 nov. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.10045>.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, [S.L.], v. 46, n. 5, p. 1133-1140, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>.

CABRAL JUNIOR, M.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. dos S.; TANNO, L. C. Argilas para Cerâmica Vermelha. In: LUZ, A. B.; FREITAS, Lins, F. A. F. (Org.) **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009, v. 1, p. 747-770.

CARVALHO, C. C. A. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO DE BERÇO AO PORTÃO EM UMA OLARIA DE CERÂMICA VERMELHA**. 2018. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro

Multidisciplinar – Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Ufersa, Pau dos Ferros, 2018.

CASSUNDÉ, J. R. O; COSTA, A. P. L. Breve análise dos impactos ambientais da indústria de cerâmica vermelha na comunidade de Espinho no município de Limoeiro do Norte/CE. **EmpíricaBR**, Rio Grande do Norte, v. 2, n. 1, p. 1-16, nov. 2022.

COELHO, M. de V. **A origem da cerâmica**. Disponível em: <https://eba.ufmg.br/bibliobelas/index.php/2022/07/a-origem-da-ceramica/#:~:text=Estudiosos%20confirmam%20ser%2C%20realmente%2C%20a,obtido%20casualmente%2C%20multiplicou%2Dse..> Acesso em: 21 nov. 2023.

DANTAS, P. R. Cerâmica Dantas (CEDAN), 20 de outubro de 2008. **Entrevista concedida para o autor In Loco**.

DEODATO, E. C. M. **O SETOR CERAMISTA E AS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA REGIÃO DE RUSSAS, NO VALE DO JAGUARIBE – CE**. 2019. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido - Ufersa, Rio Grande do Norte, 2019.

DRPIĆ, A.; SPASOJEVIĆ-IANTIĆ, T.; RADOJEVIĆ, Z. Environmental Product Declaration (EPD) For Clay Roof Tiles-Case Study: production plant of clay roof tiles in republic of serbia. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 1196, n. 1, p. 012031, 1 out. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1196/1/012031>.

ECOINVENT. **Ecoinvent**. 2024. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>. Acesso em: 08 mar. 2024.

EBOLOR, A.; AGARWAL, N.; BREM, A. Sustainable development in the construction industry: the role of frugal innovation. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 380, p. 134922, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134922>.

ESCAMILLA, E. Z.; HABERT, G.; WOHLMUTH, E. When CO2 counts: sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the philippines. **Building and Environment**, [S.L.], v. 103, p. 44-53, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.003>.

EUROPEAN CERAMIC INDUSTRY ASSOCIATION et al. **Ceramic Roadmap to 2050. Continuing Our Path Towards Climate Neutrality**, 2021.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Lify-cycle assessment: inventory guidelines and principles**. 1993. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30003W9K.PDF?Dockey=30003W9K.PDF>. Acesso em: 14 ago. 2023.

FIEC, SISTEMA FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO CEARÁ. **Revista FIEC. Revista da Fiec**, [s. l], v. 75, n. 8, p. 39-41, ago. 2013.

GRUBERT, E. Beyond carbon in socioenvironmental assessment: life cycle assessment as a decision support tool for net-zero energy systems. **Energy and Climate Change**, [S.L.], v. 2, p. 100061, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100061>.

GUINÉ, JB; GORREÉ, M.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIN, R.; KONING, A. de; OERS, L. van; WEGENER Sleeswijk, A.; SUH, S.; Udo de HAES, HA; Bruijn, H. de; DUIN, R. van; HUIJBREGTS, MAI 2002. **Handbook on life cycle assessment**. Operational guide to ISO standards.

HERRMANN, I. T.; MOLTESEN, A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 86, p. 163-169, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.004>.

IBÁÑEZ-FORÉS, V.; BOVEA, M. Dolores; SIMÓ, A. Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 16, n. 9, p. 916-928, 4 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0322-6>.

IPCC. **Relatório de síntese AR6**: mudanças climáticas 2023. Mudanças climáticas 2023. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 18 nov. 2023.

IPT (São Paulo). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2003. Disponível em: <https://www.fca.unesp.br/Home/Extensao/GrupoTimbo/manualUsodaMadeira.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2024.

IVANICA, R.; RISSE, M.; WEBER-BLASCHKE, G.; RICHTER, K. Development of a life cycle inventory database and life cycle impact assessment of the building demolition stage: a case study in Germany. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 338, p. 130631, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130631>.

JAGUARUANA TÊXTIL LTDA (org.). **Fios de algodão Jaguatêxtil, tecnologia para produtos 100% ecológicos**: jaguatêxtil utiliza tecnologia de vanguarda para produzir fios coloridos de alta qualidade a partir da recuperação de fibras têxteis, minimizando os efeitos nocivos ao meio ambiente. 2023. Disponível em: <https://jaguatextil.com.br/produtos-jaguatextil/>. Acesso em: 10 ago. 2023.

JOHANSSON, F.; KARLSSON, I.; ROOTZÉN, J.; AHLBÄCK, A.; GUSTAVSSON, M. The framing of a sustainable development goals assessment in decarbonizing the construction industry – Avoiding “Greenwashing”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 131, p. 110029, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110029>.

KAYA, I. The Mandatory Social and Environmental Reporting: evidence from france. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [S.L.], v. 229, p. 206-213, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.130>.

KEISER, D.; SCHNOOR, L. H.; PUPKES, B.; FREITAG, M. Life cycle assessment in aviation: a systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. **Journal of Air Transport Management**, [S.L.], v. 110, p. 102418, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102418>.

LIMA, L.; TRINDADE, E.; ALENCAR, L.; ALENCAR, M.; SILVA, L. Sustainability in the construction industry: a systematic review of the literature. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 289, p. 125730, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>.

LOANNOU, L.; SERAFEIM, G. The Consequences of Mandatory Corporate Sustainability Reporting, 2017. **Harvard Business School Research Working Paper**. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20Consequences%20of%20Mandatory%20Corporate%20Sustainability%20Reporting%20%3A%20Evidence%20from%20Four%20Countries&publication_year=2014&author=I.%20Ioannou&author=G.%20Serafeim. Acesso: 03 nov. 2023.

KLEWITZ, J.; HANSEN, E. G. Sustainability-oriented innovation of SMEs: a systematic review. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 65, p. 57-75, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.017>.

MARK GOEDKOOP (USA). **SimaPro Tutorial**: may 2014. 5.1 San Francisco: Pré, 2014. 89 p.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 160-175, 24 nov. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>.

MENDES JUNIOR, B. O. A indústria têxtil no Nordeste, Norte de Minas e Norte do Espírito Santo - Contextualização e Perspectivas. **Caderno Setorial ETENE**. Fortaleza, 2019.

MEZQUITA, A.; MONFORT, E.; FERRER, S.; GABALDÓN-ESTEVAN, D.. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: dry versus wet route. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 168, p. 1566-1570, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.082>.

MONFORT, E.; MEZQUITA, A.; VAQUER, E.; MALLOL, G.; ALVES, H. J.; BOSCHI, A. O. Consumo de energía térmica y emisiones de dióxido de carbono en la fabricación de baldosas cerámicas Análisis de las industrias Española y Brasileña. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 275-284, 30 out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3989/cyv.392012>.

MORINI, A. A.; RIBEIRO, M. J.; HOTZA, D. Early-stage materials selection based on embodied energy and carbon footprint. **Materials & Design**, [S.L.], v. 178, p. 107861, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107861>.

NOSHADRAVAN, A.; WILDNAUER, M.; GREGORY, J.; KIRCHAIN, R. Comparative Pavement Life-Cycle Assessment With Parameter Uncertainty. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 25, p. 131–138, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.10.002>.

NUNES, A. C. N.; RESENDE, S. S. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) e Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM), 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 27 out. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Versão preliminar do Quadro Global da Biodiversidade Pós-2020**. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/resources/publicacoes/versao-preliminar-do-quadro-global-da-biodiversidade-pos-2020#:~:text=O%20Secretariado%20da%20Conven%C3%A7%C3%A3o%20das,seus%20servi%C3%A7os%20essenciais%20%C3%A0s%20pessoas..> Acesso em: 20 fev. 2023.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F. de; COSTA, E. B. da; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 7-20, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212014000400002>.

PEDERSEN, C. S. The UN Sustainable Development Goals (SDGs) are a Great Gift to Business! **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 69, p. 21-24, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2018.01.003>.

PRÉ SUSTAINABILITY. **SimaPRO: LCA software for informed changemakers**. LCA software for informed changemakers. 2024. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 07 set. 2024.

QUANTIS (ed.). **Análise Comparativa do Ciclo de Vida das Telhas Cerâmicas versus Telhas de Concreto**. Relatório final. Preparado para: ANICER. Quebec: Quantis Canadá, 2011. 77 p.

QUINTEIRO, P.; ALMEIDA, M. I.; SERRA, J.; ARROJA, L.; DIAS, A. C. Life cycle assessment of ceramic roof tiles: a temporal perspective. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 363, p. 132568, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132568>.

REMY, N., SPEELMAN, E., & SWARTZ, S. M. Sustainability. **Style that's sustainable: A new fast-fashion formula**, 2016.

SANTOS, J. E. De C. Dos. Avaliação do Controle Estatístico de Processo das Indústrias Cerâmicas da Região Metropolitana de Curitiba com base nos Índices de Capacidade. 2006. 132f. **Dissertação (Mestrado em Construção Civil)**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

SEBRAE. **Construção civil: veja as tendências cerâmicas para 2023**. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/construcao-civil-veja-as-tendencias-ceramicas-para-2023,e9c50c8c450d5810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SEO, E.S.M., KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: Ferramenta gerencial para tomada de decisão. **InterfacEHS. Revista de gestão integrada em saúde do trabalho e meio ambiente**.

2006.<https://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/wp-content/uploads/2013/07/2006-v1-art4-portugues.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SILVA, M. S. da; LANA, T. R.; SILVA JÚNIOR, J. A.; TALARICO, M. G. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: revisão bibliográfica. **Revista Mythos**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 51-61, 25 jun. 2021. *Revista Mythos*. <http://dx.doi.org/10.36674/mythos.v14i2.467>.

SONNEMANN, G. W.; SCHUHMACHER, M.; CASTELLS, F. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 3, p. 279–292, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00028-8).

SOUZA, D. M.; LAFONTAINE, M.; CHARRON-DOUCET, F.; BENGUA, X.; CHAPPERT, B.; DUARTE, F.; LIMA, L. Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 89, p. 165-173, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.029>.

TÜRKMEN, B. A.; ÖZBILEN, Ş. K.; DUHBACđ, T. B. Improving the sustainability of ceramic tile production in Turkey. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 27, p. 2193-2207, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2021.05.007>.

TOPPLE, C.; DONOVAN, J. D.; MASLI, E. K.; BORGERT, T. Corporate sustainability assessments: MNE engagement with sustainable development and the SDGs. **Transnational Corporations**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 61-71, 27 dez. 2017. United Nations Publications. <http://dx.doi.org/10.18356/2ae5911c-en>.

UNICEF. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ainda é possível mudar 2030**. Ainda é possível mudar 2030. 2023. Disponível em: <https://www.unicef.org/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 03 nov. 2023.

VAZQUEZ, K. C.; REIS, C.; ROMERO, J. P.; CIMINI, F.; RAMOS, L.; ALVARENGA, M. Cinco missões para o desenvolvimento transformador do Brasil: metodologia e resultados do estudo-base do plano abde 2030 de desenvolvimento sustentável. **Revista Tempo do Mundo**, [S.L.], n. 29, p. 207-270, 15 ago. 2022. Instituto de Pesquisa Economica Aplicada - IPEA. <http://dx.doi.org/10.38116/rtm29art7>.

VIEIRA, A. W.; ROSSO, L. S.; DEMARCH, A.; PASINI, D.; RUZZA, S. P.; ARCARO, S.; RIBEIRO, M. J. A. Life cycle assessment in the ceramic tile industry: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.L.], v. 23, p. 3904-3915, mar. 2023.

VIEWTECH (org.). **Motor Elétrico Trifásico 1,5CV Weg 220/380V 4P Blindado W22**. 2024. Disponível em: <https://www.viewtech.ind.br/motor-eletrico-trifasico-1-5cv-weg-220-380v-4p-blindado-w22>. Acesso em: 26 jul. 2024.

APÊNDICE A — QUESTIONÁRIO BASE PARA COLETA DE INFORMAÇÕES

Fabricante:	
Endereço:	
Contato:	
Data da visita:	
Pesquisadores:	

INVENTÁRIO GERAL				
Tipo/ especificação do produto fabricado	Produção mensal			Observação
	mês 1	mês 2	mês 3	
Produção total de telhas - em UNIDADE				
A produção informada inclui perdas? Se sim, qual o índice de perdas?				

DADOS GERAIS DE CONSUMO (MENSAIS)					
Item de consumo	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Unidade	Observação
Fontes de energia					
Energia elétrica				KWh	
Diesel				L	

Sobras de Tecido				t	
(especificar se houver outra fonte de energia)					
Água					
Rede de abastecimento				m ³	
Poço				m ³	
(especificar se houver outra fonte de água)					

TRANSPORTE DOS ITENS DE CONSUMO

Fontes de energia

Especificação	Origem (cidade/ distância até a fábrica)	Tipo de transporte	Carga por viagem	Observação
Diesel				
(especificar se houver outra fonte de energia)				

LEVANTAMENTO DE MATÉRIA-PRIMAS

Composição das telhas

Especificação	% (massa)	Conteúdo da	Origem (cidade/	Tipo de	Carga por	Observação
---------------	-----------	-------------	-----------------	---------	-----------	------------

	telha	embalagem	distância da fábrica)	transporte	viagem	
Argila 1						
Argila 2						
Água						
(especificar se houver outros materiais)						

APÊNDICE B — DADOS UTILIZADOS NO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Dados	Especificação	Quantidade	Fonte
Telha	Produção mensal de telhas (unid)	600567,41	Indústria Cerâmica
	Quantidade de telhas por câmara (unid)	43000	Indústria Cerâmica
	Forno CEDAN - número de câmaras (unid)	14	Indústria Cerâmica
	Peso telha (kg)	1,1	Quantis (2011)
	Metro quadrado de telhas (unid)	32	Indústria Cerâmica
Argila	Quantidade de argila média para a produção mensal de telhas (m³)	523,74	Indústria Cerâmica
	Distância média da lavra de extração da argila (km)	4,5	Indústria Cerâmica
	Número médio de viagens para a lavra de argila	130, duas vezes por ano	Indústria Cerâmica
	Massa específica - argila	1700 kg/m³	Archsolo (2024)
Água	Quantidade de água média para matéria - prima	111,36 m³	Indústria Cerâmica
	Consumo motor trifásico elétrico (1,5 cv)	1,1 kw	Viewtech (2024)
Energia elétrica	Energia elétrica (KWh)	14521,45	Indústria Cerâmica
Lenha	Quantidade de lenha mista - secagem (média)	26,1 m³	Indústria Cerâmica
	Quantidade de lenha mista - queima (média)	234,9 m³	Indústria Cerâmica
	Massa específica lenha	1100 kg/m³	IPT (2003)
	Distância média - local de retirada de lenha (km)	4,5	Indústria Cerâmica
	Carga por caminhão (ton)	até 32	<i>Ecoinvent</i>
Resíduo de fibra de algodão têxtil reciclado	Quantidade de fibra de algodão (kg)	60900	Indústria Cerâmica
	Distância da empresa de tecido - Jaguatêxtil (km)	27,1	<i>Google maps</i>
	Quantidade média de viagens para fábrica - mês	28	Indústria Cerâmica

APÊNDICE C — EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA INSERÇÃO DOS DADOS NO SIMAPRO

- **Quantificação da argila extraída (kg):**

- Quantidade de argila extraída média (mensal) - 523,74 m³
- Massa específica argila - 1700 kg/m³ (Archsolo)
- 0,5 m² de telhas - 16 unidades
- Produção média de telhas (mensal) - 600567,41 unid

PASSO 1 - Quantidade de argila média (kg):

$$\text{Argila mensal (m}^3\text{)} \times \text{Peso médio argila (Kg/m}^3\text{)}$$

PASSO 2 - Quantidade de argila extraída (kg/m²):

$$[\text{Argila média (kg)} \div \text{Telhas produzidas mensalmente (unid)}] \times 16$$

- **Extração da argila - escavadeira hidráulica (m³):**

PASSO 1 - Quantidade de argila extraída média (m³/m²):

$$[\text{Argila mensal (m}^3\text{)} \div \text{Telhas produzidas mensalmente (unid)}] \times 16$$

- **Transporte da argila para fábrica (T.km):**

- Distância média da lavra de argila - 4,5 km
- Número de viagens para a lavra de argila - 130 viagens (duas vezes por ano)

PASSO 1 - Transporte da argila (T.km):

$$[\text{Argila média (ton)} \times \text{distância percorrida mensal (km)}]$$

PASSO 2 - Transporte da argila para 0,5 m² de telhas

$$[\text{Transporte da argila (T.km)} \div \text{Telhas produzidas mensalmente (unid)}] \times 16$$

- **Mistura da argila - skid loader (m³):**

PASSO 1 - Quantidade de argila misturada média:

$$[Argila\ mensal\ (m^3) \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Água de poço - consumo bomba elétrica (MJ):**

- Consumo motor trifásico 1,5 cv elétrico - 1,1 kw (Viewtech)
- Vazão máxima - 21,4 m³/h
- horas trabalhadas mensais - 5,20 h

PASSO 1 - Consumo motor (MJ) mensal:

$$[Consumo\ médio\ do\ motor\ (w) \times tempo\ médio\ trabalhado\ mês\ (h)] \times 3,6$$

PASSO 2 - Consumo motor para 0,5 m² de telhas:

$$[Consumo\ motor\ (Mj)\ mensal \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Quantificação da lenha para secagem (kg):**

- Quantidade de lenha mista para secagem mensal (média) - 26,1 m³
- Massa específica lenha - 1100 kg/m³ (Eucalyptus)
- Produção média de telhas (mensal) - 600567,41 unid

PASSO 1 - Lenha para secagem (kg):

$$Lenha\ mensal\ sec.\ (m^3) \times Peso\ médio\ lenha\ (Kg/m^3)$$

PASSO 2 - Quantidade de lenha para 0,5 m² de telhas:

$$Lenha\ para\ secagem\ (kg) \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Transporte de lenha - etapa de secagem (T.km):**

- Distância média para extração de lenha - 4,5 km
- Carga - até 32 toneladas por caminhão (Ecoinvent)

PASSO 1 - Transporte de lenha sec. (T.km):

$$[Lenha\ para\ secagem\ (kg) \times 1000 \times distância\ percorrida\ mensal\ (km)]$$

PASSO 2 - Transporte de lenha sec. para 0,5 m² de telhas

$$[Transporte\ de\ lenha\ sec.\ (T.km) \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Quantificação da lenha para queima (kg):**

- Quantidade de lenha mista para queima mensal (média) - 234,9 m³
- Massa específica lenha - 1100 kg/m³ (Eucalyptus)
- Produção média de telhas após perdas (mensal) - 600567,41 unid

PASSO 1 - Lenha para queima (kg):

$$Lenha\ mensal\ queima\ (m^3) \times Peso\ médio\ lenha\ (Kg/m^3)$$

PASSO 2 - Quantidade de lenha para 0,5 m² de telhas (kg/m²):

$$Lenha\ para\ queima\ (kg) \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Transporte de lenha - etapa de queima (T.km):**

- Distância média para extração de lenha - 4,5 km
- Carga - até 32 toneladas por caminhão (*Ecoinvent*)

PASSO 1 - Transporte da lenha para queima (T.km):

$$[Lenha\ média\ queima\ (ton) \times distância\ percorrida\ (km)]$$

PASSO 2 - Transporte de lenha queima para 0,5 m² de telhas:

$$Transporte\ de\ lenha\ queima\ (T.km) \div Telhas\ produzidas\ mensalmente\ (unid)] \times 16$$

- **Quantificação da fibra para queima (kg):**

- Quantidade de fibra para queima mensal (média) - 60900 kg
- Produção média de telhas após perdas (mensal) - 600567,41 unid

PASSO 1 - Fibra para queima (kg):

$$\text{Fibra mensal queima (m}^3\text{)} \times \text{Peso médio fibra (Kg/m}^3\text{)}$$

PASSO 2 - Quantidade de fibra para 0,5 m² de telhas (kg/m²):

$$\text{Lenha para queima (kg)} \div \text{Telhas produzidas mensalmente (unid)}] \times 16$$

- **Transporte de fibra para queima (T.km):**

- Distância média para fábrica da fibra de algodão - 27,1 km
- Número de viagens médias para a fábrica (mensal) - 28 viagens

PASSO 1 - Transporte de fibra (T.km):

$$[\text{Fibra mensal queima (kg)} \times 1000 \times \text{distância percorrida mensal (km)}]$$

PASSO 2 - Transporte de fibra para 0,5 m² de telhas:

$$\text{Transporte de fibra (T. km)} \div \text{Telhas produzidas mensalmente (unid)}] \times 16$$

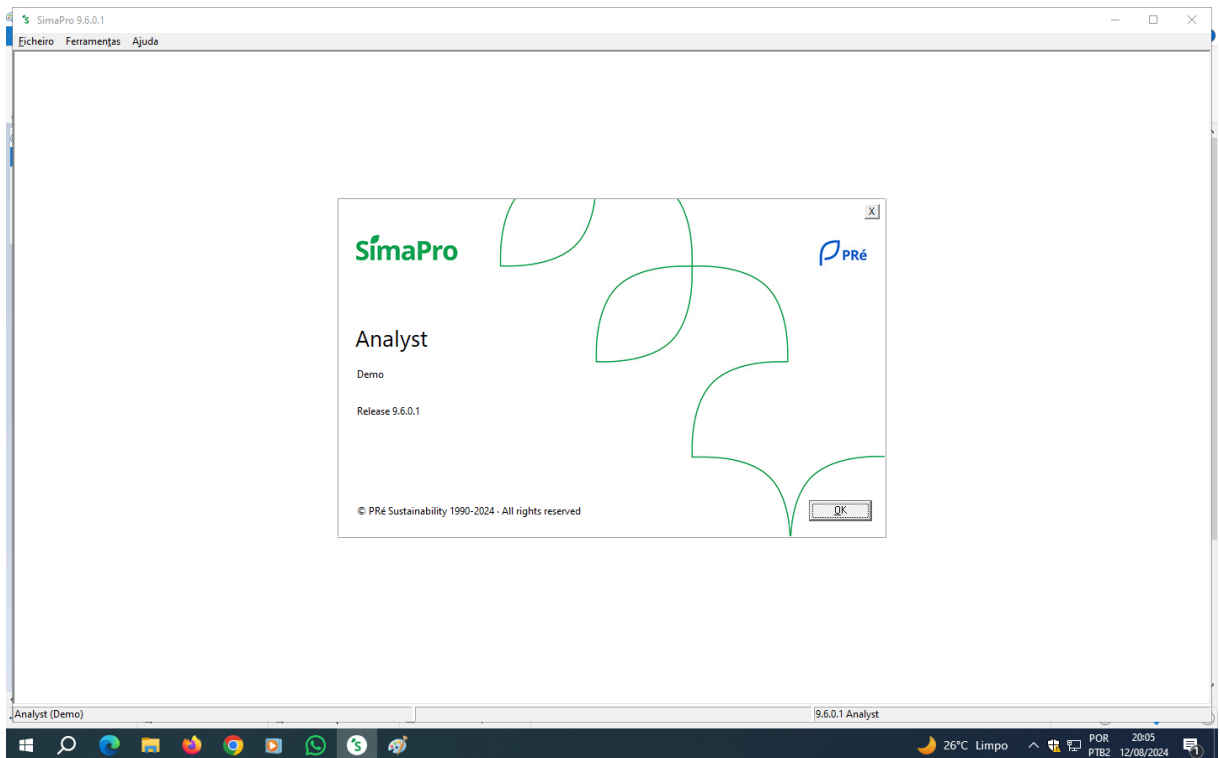
- **Energia elétrica (kWh)**

Os dados referentes a energia elétrica foram fornecidos pela companhia fornecedora através das faturas referentes ao consumo mensal de eletricidade, no qual não foi necessário conversão de unidade, pois já estava em quilowatt-hora (kWh).

APÊNDICE D - PASSO A PASSO DA SIMULAÇÃO MONTE CARLO

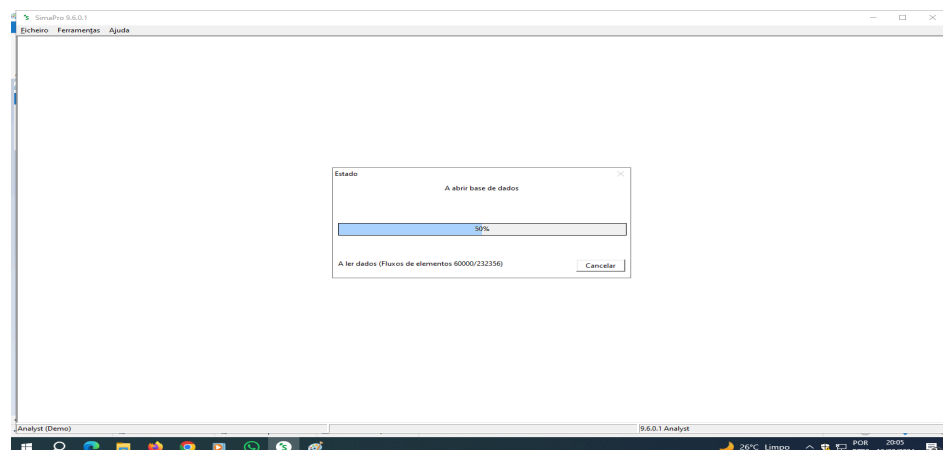
Esta seção ilustra o passo a passo realizado para a avaliação de incerteza com a simulação de Monte Carlo para os Cenários 01 e 02 por meio das Figuras D 1 à D 10.

Figura D 1 - Tela de inicialização do *software* SimaPro



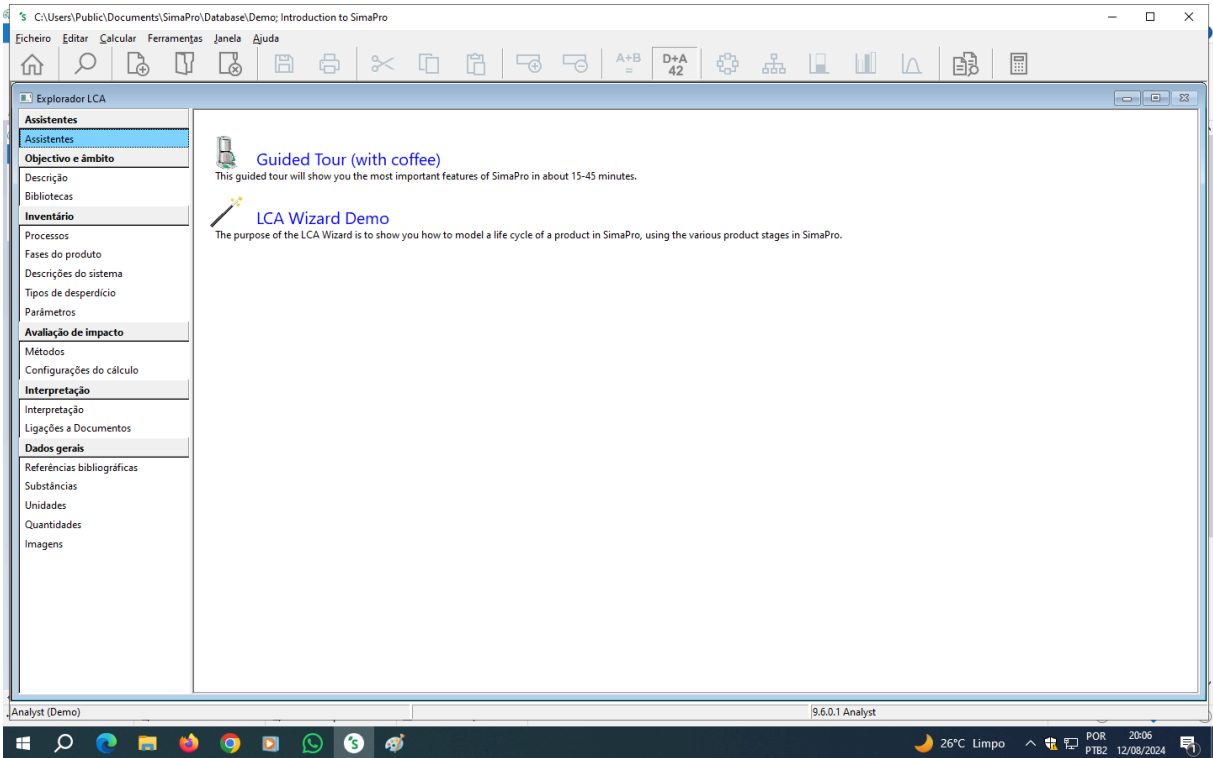
Fonte: Autora (2024).

Figura D 2 - Carregamento da base de dados



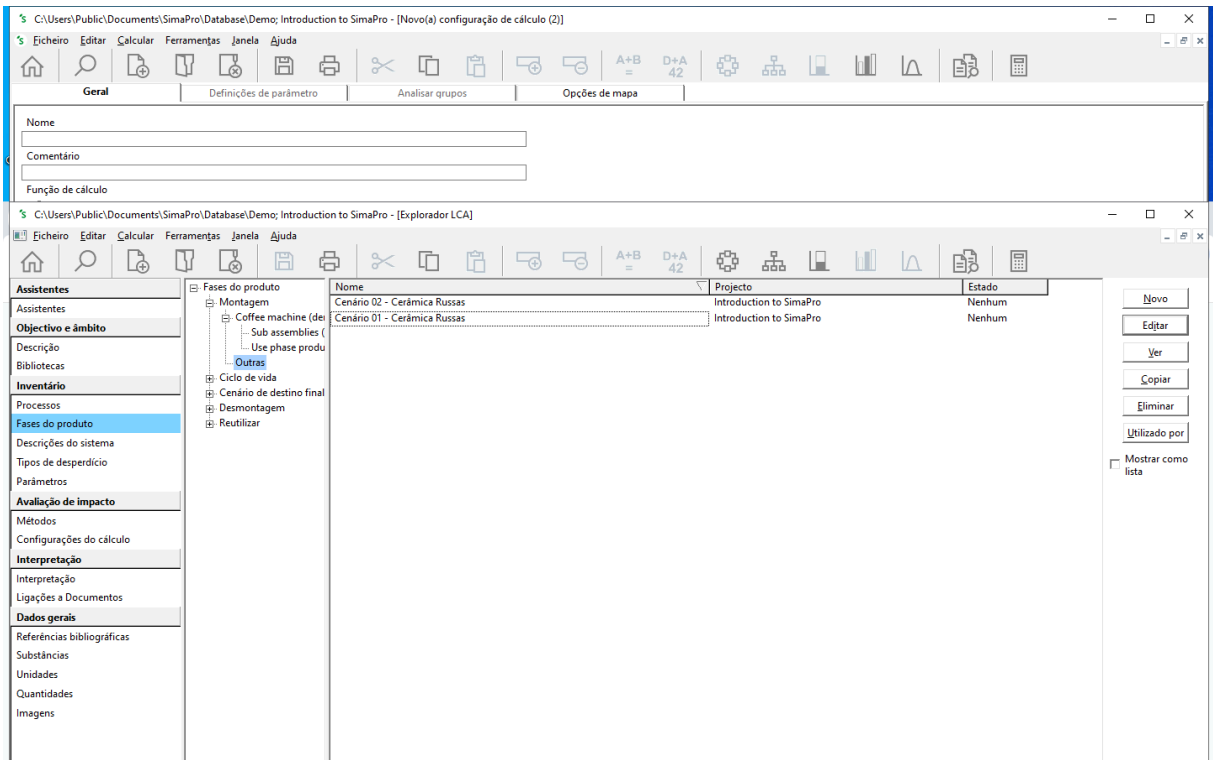
Fonte: Autora (2024).

Figura D 3- Biblioteca de navegação do *software*



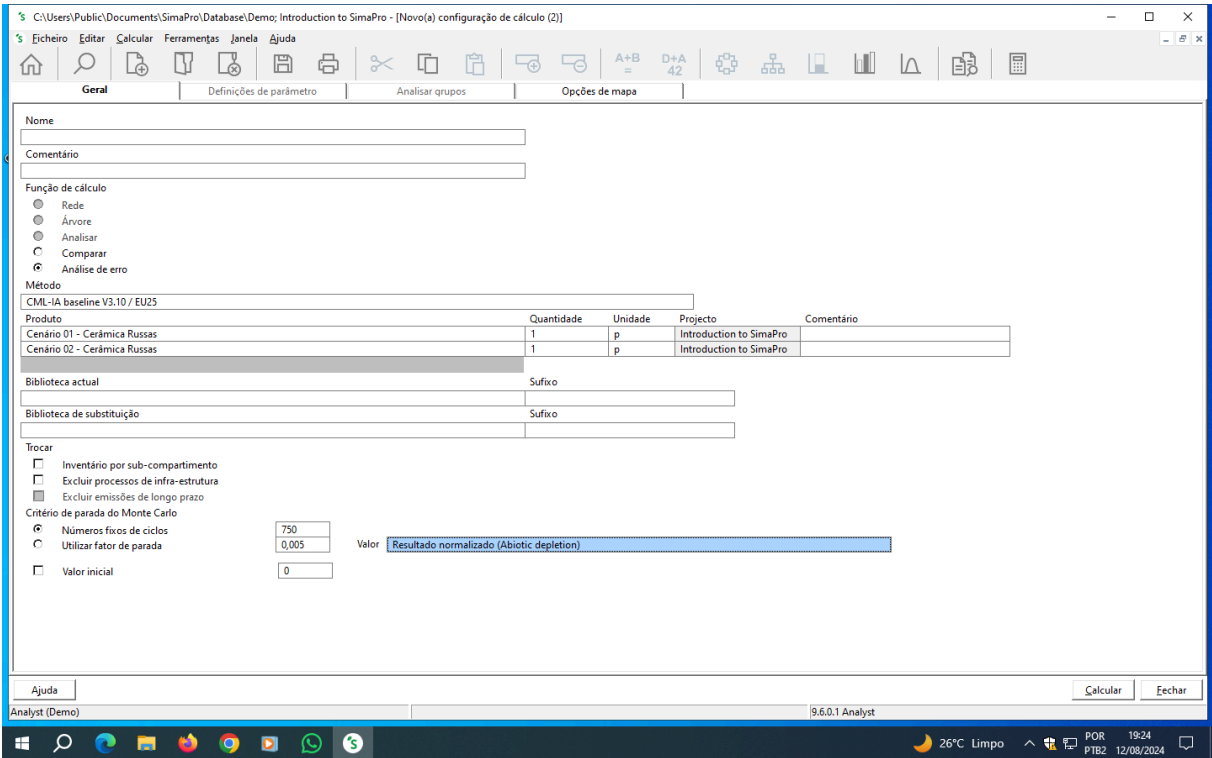
Fonte: Autora (2024).

Figura D 4 - Seleção dos cenários utilizados na simulação



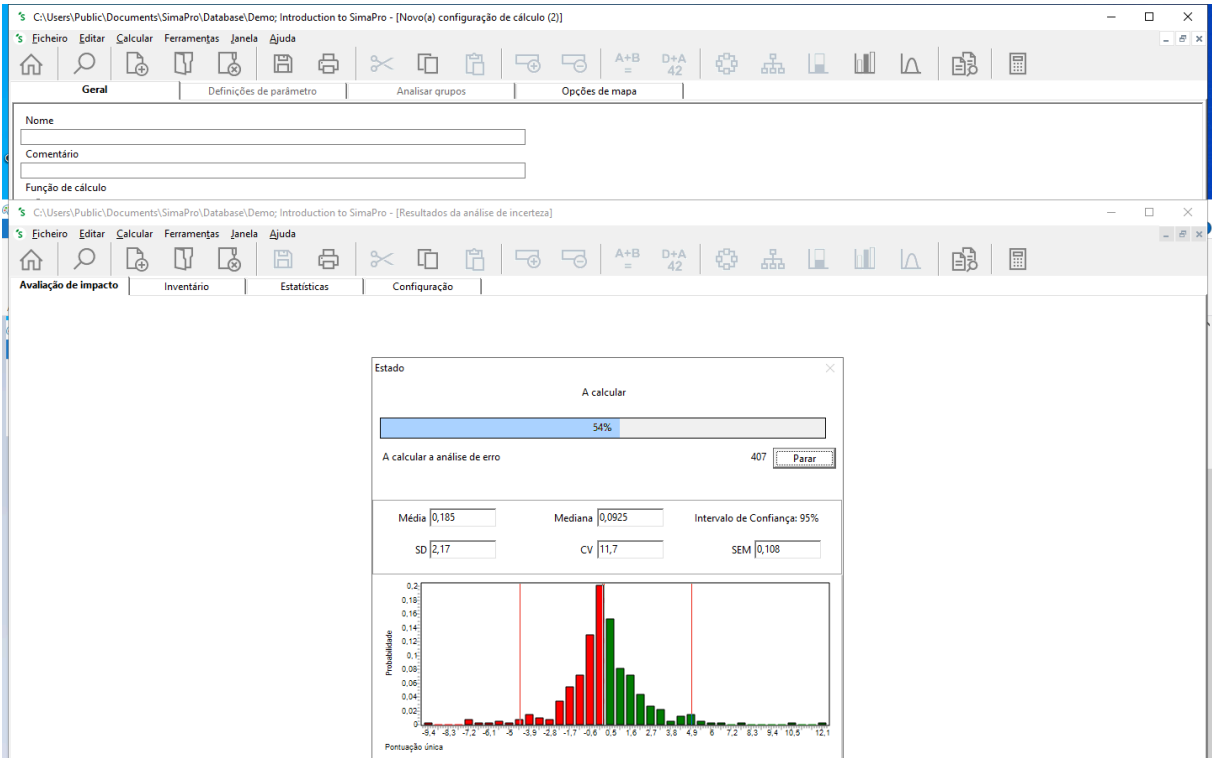
Fonte: Autora (2024).

Figura D 5- Seleção dos outros parâmetros a serem utilizados na simulação



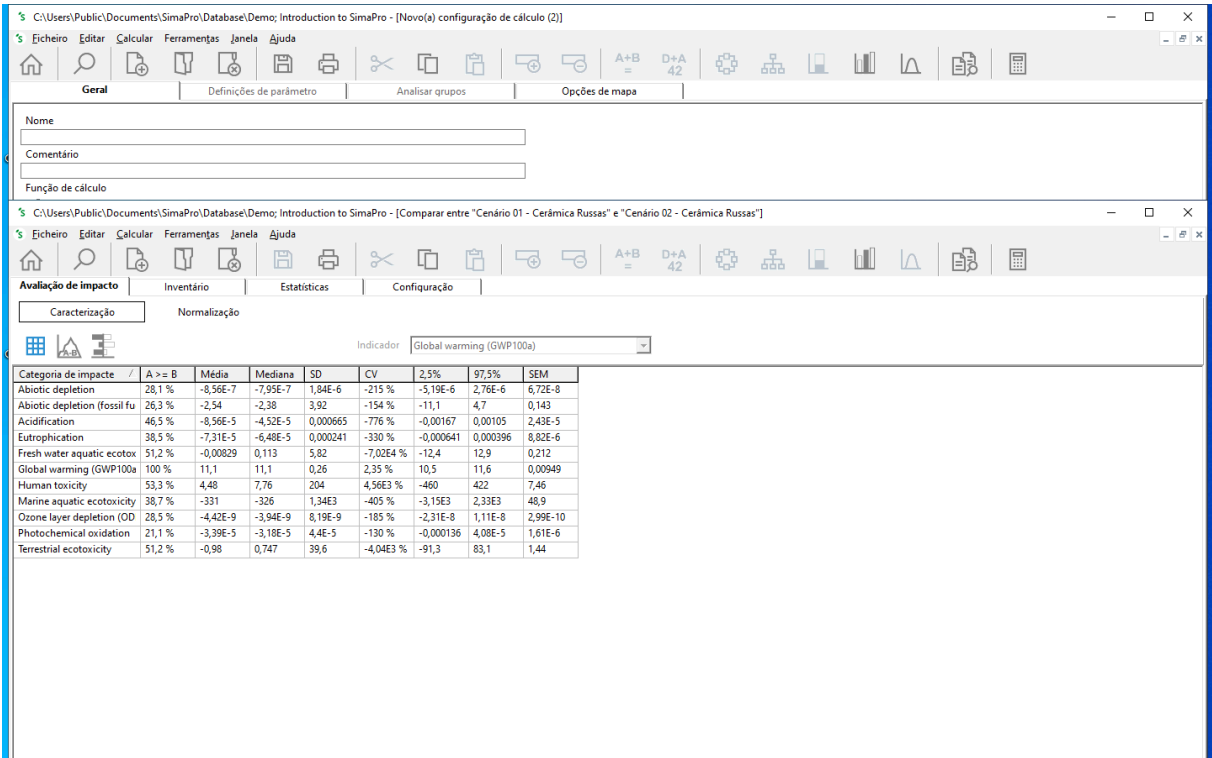
Fonte: Autora (2024).

Figura D 6 - Simulação sendo calculada



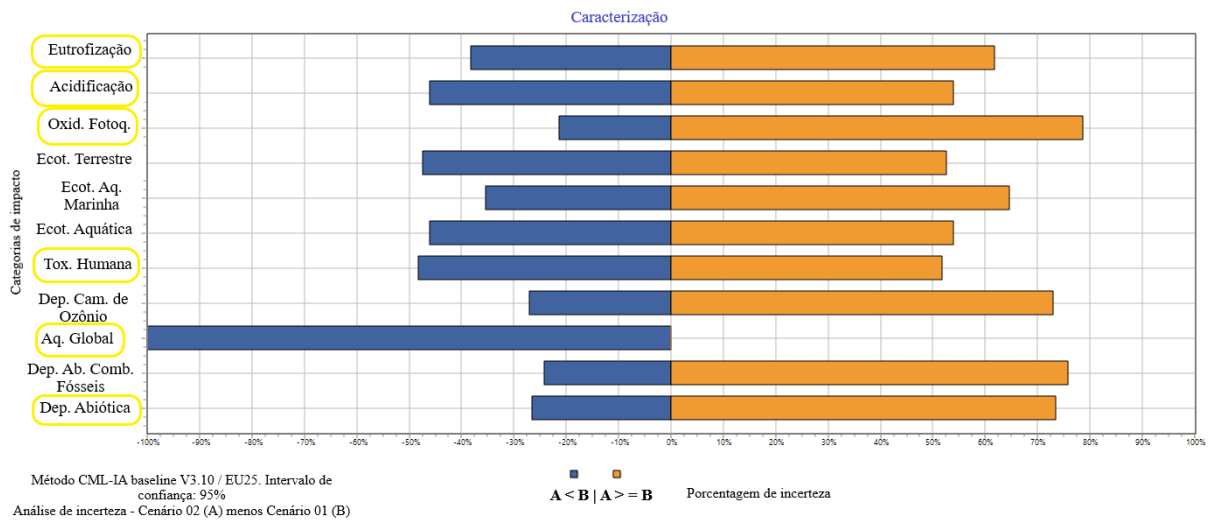
Fonte: Autora (2024).

Figura D 7 - Resultado da Simulação - Avaliação de impacto - Tabela



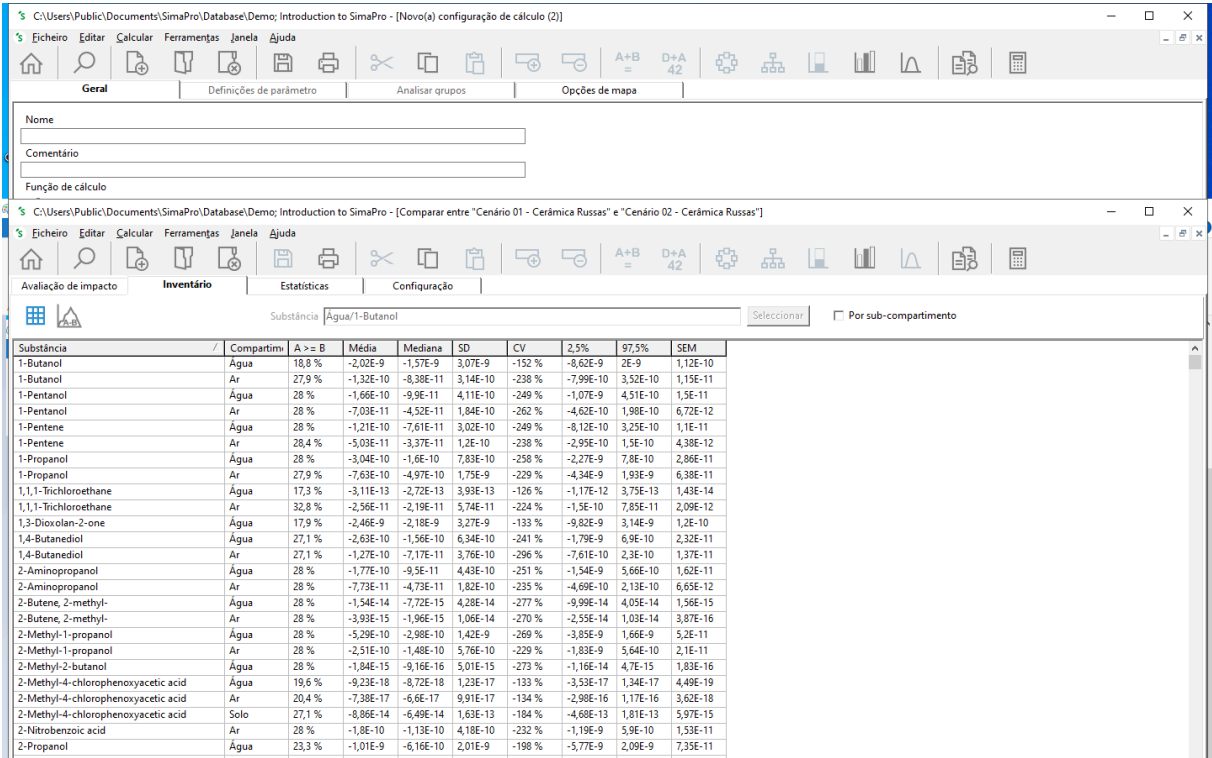
Fonte: Autora (2024).

Figura D 8 - Resultado da Simulação - Avaliação de impacto - Gráfico



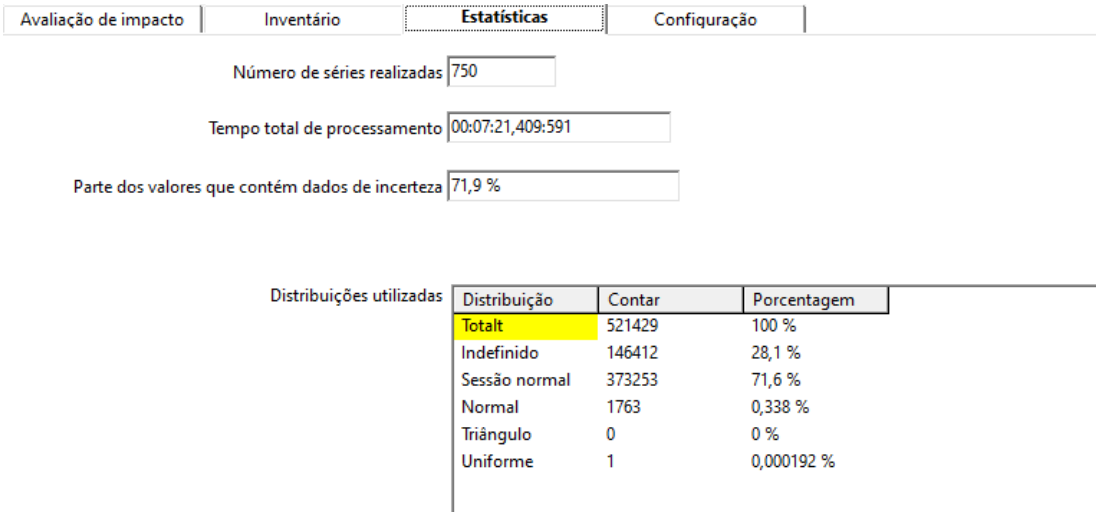
Fonte: Autora (2024).

Figura D 9 - Resultado da simulação - Inventário



Fonte: Autora (2024).

Figura D 10 - Resultado simulação - estatísticas



Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE E — RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS POR MONTE CARLO

Categorias	A>= B	Média	Mediana	SD	CV%	2,5%	97,5%
Elementos de esgotamento abiótico	23,5%	-8,8E-7	-7,9E-7	1,7E-6	-195	-4,98E-6	2,54E-6
Acidificação	42,4%	-1,28E-4	-8,75E-5	6,73E-4	-526	-1,74E-3	1,08E-3
Eutrofização	36,7%	-8,19E-5	-6,16E-5	2,34E-4	-286	-6,2E-4	3,44E-4
Aquecimento global	100%	11,1	11,1	0,258	2,33	10,5	11,5
Toxicidade Humana	47,2%	0,744	-10,1	239	3,09E-4	-458	506
Oxidação fotoquímica	18,1%	-3,68E-5	-3,49E-5	4,49E-5	-122	-1,36E-5	4,39E-5
Intervalo de confiança: 95%							
Número de corridas: 750							

Cenário 01: A

Cenário 02: B