



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**RAFAEL BARBOSA MOREIRA MONTEIRO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO FERRAMENTA PARA ANALISAR OS  
IMPACTOS DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO DA PORCELANA**

**RECIFE**

**2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**RAFAEL BARBOSA MOREIRA MONTEIRO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO FERRAMENTA PARA ANALISAR OS  
IMPACTOS DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO DA PORCELANA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

**Orientador(a): Felipe Pedro da Costa  
Gomes**

**RECIFE**

**2025**

RAFAEL BARBOSA MOREIRA MONTEIRO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO FERRAMENTA PARA ANALISAR OS  
IMPACTOS DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO DA PORCELANA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 09/04/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>o</sup>. Dr.(a) Ana Paula Lima Pacheco (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Alex Leandro Andrade de Lucena (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Monteiro, Rafael Barbosa Moreira.

Avaliação do ciclo de vida como ferramenta para analisar os impactos do aproveitamento de resíduos do processo de fabricação da porcelana / Rafael Barbosa Moreira Monteiro. - Recife, 2025.

48 p. : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. avaliação de ciclo de vida. 2. porcelana. 3. reprocessamento. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Andréa e Vicente, que não mediram esforços para sempre me permitir buscar as melhores oportunidades de crescimento, pelo qual eu reconheço o enorme privilégio que tenho ao ser filho de vocês. Em cada conquista minha terá uma parcela enorme dos dois por toda a educação e criação que eu recebi na minha formação como ser humano.

Ao meu irmão, Edmar, por me ensinar coisas que nem era sua obrigação de ensinar. E o mais importante, ser uma verdadeira inspiração e espelho para o que eu quero me tornar no futuro.

A todas as pessoas que me acompanharam durante a jornada na graduação, Ellen Dikauá, Elydiane Morais, Fernanda Melo, Gabriel Eliseu, Heitor Rennan, vocês facilitaram todo o processo apenas por estarem lá juntos comigo. Em especial agradeço a Ágata Deodato, que foi minha principal companhia de estudos, trabalhos e estresses na faculdade, que estreitaram nossos laços a ponto de transbordar em forma de amor, agradeço pelo presente que é ter você em minha vida.

A todos os professores que passaram por minha vida acadêmica, desde o maternal até a graduação, vocês me fizeram ser a pessoa que sou hoje, com paixão por descobrir e aprender coisas novas e com a melhor educação possível. Em especial ao meu orientador, Profº Felipe Gomes, a quem me deu suporte durante esse trabalho.

À UFPE, pela oportunidade e pelos ensinamentos.

## RESUMO

A análise dos impactos ambientais no processo de fabricação da porcelana se tornou essencial, considerando a importância dos materiais cerâmicos e a crescente preocupação com a redução de emissões alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Este estudo realiza uma análise dos impactos ambientais do processo produtivo da porcelana, considerando a eficiência do processo e a incorporação de refugo na formulação da massa cerâmica como fatores, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A metodologia adotada envolve a modelagem do sistema produtivo utilizando o software OpenLCA e a base de dados *Environmental Footprints*, permitindo a quantificação dos impactos em diferentes categorias ambientais. Os resultados apontam que os processos de extração das matérias-primas e o alto consumo de gás natural nos fornos de queima representam as principais fontes de emissões, tornando essencial a busca por alternativas que aumentem a eficiência térmica do processo, além disso, o reaproveitamento de resíduos na formulação da massa mostrou-se uma estratégia viável para reduzir os impactos ambientais, desde que respeitadas as condições adequadas, como a proporção máxima de 20% e a temperatura de queima compatível. Conclui-se que a melhoria da eficiência do processo, associada ao reaproveitamento dos resíduos, é fundamental para minimizar os impactos ambientais da produção de porcelana, podendo chegar em reduções de até 15% nos diversos impactos, em que os principais são o uso de recursos fósseis/emissões de gases do efeito estufa, sendo necessário aprofundar estudos sobre o aumento do percentual de incorporação sem comprometer as propriedades do produto final.

**Palavras-chave:** avaliação de ciclo de vida; porcelana; reprocessamento.

## ABSTRACT

The analysis of environmental impacts in the porcelain manufacturing process has become essential, considering the importance of ceramic materials and the growing concern with reducing emissions in line with the UN Sustainable Development Goals (SDGs). This study analyzes the environmental impacts of the porcelain production process through Life Cycle Assessment (LCA), varying the scenarios according to the efficiency of the process and the incorporation of waste in the ceramic mass formulation. The methodology adopted involves modeling the production system using the OpenLCA software and the Environmental Footprints database, allowing the quantification of impacts in different environmental categories. The results indicate that the raw material extraction processes and the high consumption of natural gas in the firing kilns represent the main sources of emissions, making it essential to search for alternatives that increase the thermal efficiency of the process. In addition, the reuse of waste in the mass formulation proved to be a viable strategy to reduce environmental impacts, as long as the appropriate conditions are respected, such as the maximum proportion of 20% and the compatible firing temperature. It is concluded that improving process efficiency, associated with the reuse of waste, is essential to minimize the environmental impacts of porcelain production, which can lead to reductions of up to 15% in the various impacts, the main ones being the use of fossil resources/greenhouse gas emissions, making it necessary to carry out in-depth studies on increasing the percentage of incorporation without compromising the properties of the final product.

**Keywords:** life cycle assessment; porcelain, reprocessing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama ternário de composições de quartzo, feldspato e caulim.	13
Figura 2 - Fluxograma de preparação da barbotina.	14
Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo da indústria de porcelana.	17
Figura 4 - As etapas da ACV e suas aplicações.	18
Figura 5 - Elementos da fase de AICV.	21
Figura 6 - Tela inicial do software OpenLCA 2.4.0.	22
Figura 7 - Fluxogramas dos processos de fabricação de revestimentos de cerâmica e de porcelana.	24
Figura 8 - Fluxograma do processo descrito no programa.	24
Figura 9 - Fluxograma do sistema de formulação de massa.	26
Figura 10 - Divisão das fontes de emissão de CO <sub>2</sub> no processo.	30
Figura 11 - Comparação do uso de recursos fósseis variando o percentual de refugo.	32
Figura 12 - Comparação do uso da terra variando o percentual de refugo.	32
Figura 13 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando o percentual de refugo.	33
Figura 14 - Comparação do uso de recursos fósseis variando a eficiência do processo.	35
Figura 15 - Comparação do uso da terra variando a eficiência do processo.	36
Figura 16 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando a eficiência do processo.	36
Figura 17 - Comparação do uso de recursos fósseis variando os cenários.	39
Figura 18 - Comparação do uso da terra variando os cenários.	39
Figura 19 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando os cenários.	40
Figura 20 - Comparação do consumo de água variando os cenários.	40
Figura 21 - Comparação da ecotoxicidade variando os cenários.	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das principais características das cerâmicas brancas apresentadas nas normas ASTM C242-15 e EN 1900.	11
Tabela 2 - Resultados dos impactos ambientais do processo de formulação da massa.	28
Tabela 3 - Resultados dos impactos ambientais do processo de fabricação.	29
Tabela 4 - Consumo de energia por unidade de peso para diferentes tipos de produtos cerâmicos.	29
Tabela 5 - Comparação dos impactos dos casos base.	31
Tabela 6 - Massas utilizadas nos cenários variando a eficiência.	31
Tabela 7 - Aumento percentual dos impactos comparado com o cenário anterior (variação da eficiência).	33
Tabela 8 - Massas utilizadas nos cenários.	35
Tabela 9 - Redução percentual dos impactos comparado com o cenário anterior (variação do percentual de refugo).	37
Tabela 10 - Cenários mesclados.	39
Tabela 11 - Diferença percentual dos impactos (variando eficiência e percentual de refugo).	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>10</b>
2.1. CERÂMICAS	10
<b>2.1.1. Cerâmicas brancas</b>	<b>10</b>
2.2. PROCESSO PRODUTIVO DA PORCELANA	12
<b>2.2.1. Preparação de massas</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2. Conformação</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3. Queima</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4. Esmaltação</b>	<b>16</b>
<b>2.2.5. Decoração</b>	<b>16</b>
2.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	17
<b>2.3.1. Definição do objetivo e escopo</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2. Análise de inventário de ciclo de vida</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3. Avaliação de impactos</b>	<b>20</b>
<b>2.3.4. Interpretação dos resultados</b>	<b>21</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>22</b>
3.1. SOFTWARE	22
<b>3.1.1. Base de dados</b>	<b>23</b>
3.2. DESENVOLVIMENTO DA ACV	23
<b>3.2.1. Definição do objetivo e escopo</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2. Definição dos cenários</b>	<b>23</b>
<b>3.2.3. Análise de inventário de ciclo de vida</b>	<b>23</b>
<b>3.2.4. Avaliação de impactos</b>	<b>26</b>
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>28</b>
4.1. PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DO PROCESSO	28
4.2. CENÁRIOS VARIANDO O PERCENTUAL DE REFUGO NA MASSA	31
4.3. CENÁRIOS VARIANDO A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO	34
4.4. CENÁRIO DE INTEGRAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA DO PROCESSO E INCORPORAÇÃO DE REFUGOS	38
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS IMPACTOS AMBIENTAIS</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As cerâmicas compreendem um dos grupos de materiais que foram utilizados na civilização desde os primórdios da humanidade, estima-se que o início de sua utilização ocorreu seguidamente ao princípio da manipulação do fogo juntamente do barro (Del Rio, 2022). Devido à sua ampla variedade de aplicações, os materiais cerâmicos sempre foram requisitados pela sociedade ao longo da história e continuam sendo utilizados até os dias atuais (Hein, 2018). Dentre as propriedades que contribuem para a ampla gama de aplicações estão a longa vida útil, resistência à corrosão, resistência ao calor e ao fogo, resistência elétrica, porosidade e outras propriedades específicas, variando de acordo com o tipo de cerâmica. Podendo assim ser aplicada nos segmentos de construção civil, revestimentos, artesanato, louça sanitária, isoladores elétricos, refratários, louças de mesa, entre outros (Carty e Senapati, 1998; Del Rio, 2022).

Existem diversas classificações de materiais cerâmicos como tijolo, vidro e porcelana, por exemplo, com suas diferenças envolvendo questões como matéria-prima, temperatura de queima, entre outras características no processamento. Na fabricação de louças de mesa tipicamente são utilizadas as chamadas “cerâmicas brancas”, que representam uma classe de produtos de coloração clara (algumas não são exatamente brancas), brilho vítreo pela presença de esmalte, de caráter translúcido ou opaco, com uma formulação típica composta por uma mistura de matérias-primas naturais e inorgânicas como caulins, argilas, feldspatos e quartzo (Cruz *et al.* 2022).

Dentre as cerâmicas brancas estão grés, faiança e porcelana, e de acordo com Carty e Senapati (1998) a porcelana se trata de um dos materiais cerâmicos mais complexos em quase todos os aspectos de seu processo de fabricação, desde matérias-primas e seu processamento até complexidades de microestrutura, desenvolvimento de fases e controle de temperaturas.

A indústria cerâmica utiliza de matérias-primas naturais e inorgânicas em sua maioria, porém apesar disso, é um setor com uma demanda energética intensiva devido aos processos utilizados na fabricação desses materiais, principalmente a atomização, a secagem e as queimas, pois 64% das emissões da indústria cerâmica é devido aos combustíveis usados nesses processos, enquanto 17% das emissões são do processo de transformação das matérias-primas e 19% são de emissões indiretas, como uso da eletricidade (Cerame-Union, 2021). Mesmo sendo um setor que utiliza majoritariamente do gás natural como fonte de energia térmica, que é considerada uma alternativa melhor do que outros combustíveis fósseis como carvão (Wang *et al.* 2020). Ainda assim, trata-se de um setor caracterizado por elevados

níveis de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), como mostrado no estudo realizado pelo Centro Cerâmico do Brasil (CCB) que apontou que em 2021 o setor cerâmico brasileiro emitiu 3,26 quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub>eq) por metro quadrado produzido.

Diante disto, e levando em consideração os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) traçados pela Organização das Nações Unidas (ONU), que buscam responder problemáticas ambientais, sociais e econômicas enfrentadas pela sociedade, através de metas a serem atendidas até 2030 inicialmente. A problemática das emissões da indústria cerâmica se encaixa em quatro dos dezessete ODS traçados. Indústria, Inovação e Infraestrutura, pois é através da inovação e mudança nos processos industriais que deve-se procurar sanar o problema; Consumo e Produção Sustentáveis, que busca assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis almejando o gerenciamento adequado de resíduos com economia circular; Ação Contra a Mudança Global do Clima, que procura tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos buscando reduzir a emissão de gases do efeito estufa como o CO<sub>2</sub>; e Cidades e Comunidades Sustentáveis, pois a diminuição de emissões atmosféricas impacta positivamente a qualidade do ar da região (IPEA, 2019).

A fim de atingir esses objetivos, existem ferramentas de gestão ambiental a serem aplicadas nas indústrias que ajudam no controle dos impactos ambientais. Uma dessas ferramentas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), metodologia utilizada internacionalmente para comparar alternativas de melhorias em um processo produtivo, por meio de uma perspectiva que avalia os benefícios ambientais ao longo de sucessivos estágios do ciclo de vida de um produto (Silvestri, *et al.* 2020).

O presente trabalho tem como objetivo utilizar a ferramenta de avaliação do ciclo de vida para buscar melhorias no processo produtivo de uma indústria de porcelana, buscando atingir uma melhor responsabilidade ambiental reduzindo os impactos causados pelo processo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CERÂMICAS

De acordo com Callister (2020), as cerâmicas são materiais inorgânicos e não metálicos formados entre elementos metálicos e não metálicos, como óxidos, nitretos e carbeto, além de minerais argilosos. Dentre suas propriedades estão a rigidez e resistência, ausência de ductilidade, isolantes à passagem de calor e eletricidade.

Na metade do século XX, os materiais mais importantes dessa categoria eram as chamadas "cerâmicas tradicionais". Esses materiais tinham a argila como principal matéria-prima e eram utilizados na produção de louças, porcelanas, tijolos, telhas, vidros e cerâmicas de alta temperatura. Ao longo das décadas seguintes surgiu uma nova geração de cerâmicas, ampliando significativamente o conceito desse termo. Esses novos materiais têm um impacto significativo na sociedade, sendo indispensáveis para setores como eletrônicos, informática, comunicação, aeroespacial e muitas outras indústrias (Callister, 2020).

As propriedades da cerâmica são amplamente determinadas pela estrutura cristalina formada e composição de seus componentes essenciais, além dos materiais de suporte utilizados no processo produtivo (Kingery, 1976). A estrutura cristalina do material cerâmico é influenciada por duas características principalmente: magnitude da carga elétrica nos íons e o tamanho relativo deles. Para isso, o cristal deve ter carga neutra e é esse fator que determina as composições dos materiais. Além disso, o tamanho dos íons deve obedecer a uma determinada razão para gerar estruturas cristalinas estáveis (Callister, 2020).

#### 2.1.1. Cerâmicas brancas

Os grupos de materiais cerâmicos podem ser classificados de acordo com aplicação dos seus produtos, natureza dos componentes, características texturais do "chacotado" (prato queimado mas ainda sem aplicação de esmalte), além de outras características cerâmicas ou técnico-econômicas (Motta *et al.* 2001).

O termo cerâmicas brancas se refere a uma classe de produtos cerâmicos de cor de queima clara (branca, creme e até acinzentada), aspecto denso, brilho vítreo, esmaltados, de caráter translúcido ou opaco, com sua formulação típica consistindo de uma mistura de matérias-primas naturais e abundantes. O fato de serem produzidos por matérias-primas de

origem semelhante e geralmente serem recobertos por um esmalte cria dificuldades extras para sua correta identificação. Em alguns casos, esses produtos desempenham a mesma função, mas suas características técnicas e estéticas podem variar bastante.

No entanto, o Brasil não dispõe de uma norma relativa à denominação desses tipos de produtos. Há apenas uma classificação que leva em consideração a absorção de água do corpo, sem analisar outros parâmetros relevantes como translucidez e cor. A classificação se divide, principalmente, em porcelana, a qual apresenta menos de 0,5% de absorção de água (a.a.); grês, que apresenta absorção de água entre 0,5% e 3,0% e faianças, que são produtos os quais possuem absorção de água maior que 3,0% (Cruz *et al.* 2022). Contudo, também existem normas internacionais que possuem classificações mais detalhadas e definidas, como a americana ASTM C242-15 e a europeia EN 1900, a qual tem mais semelhança com a classificação adotada no Brasil. A Tabela 1 demonstra as principais diferenças entre as duas normas.

Tabela 1 - Comparação das principais características das cerâmicas brancas apresentadas nas normas ASTM C242-15 e EN 1900.

<b>Produto</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>ASTM C242-15 Características</b>	<b>Absorção de água (%)</b>	<b>EN 1900 Características</b>
Porcelana ( <i>Porcelain</i> )	< 0,5	Produtos técnicos, processo típico de porcelanas técnicas (monoqueima).	< 0,5	Translúcida, ressonante, vítrea.
Grês ( <i>Stoneware</i> )	< 0,5	Cerâmica vítrea.	-	-
	De 0,5 a 3,0	Revestimentos e porcelana elétrica de baixa voltagem.	De 0,5 a 3,0	Parcialmente vitrificado, impermeável, naturalmente colorido, duro e opaco.
	De 0,5 a 10,0	Cerâmica semivítrea.	-	-
	De 3,0 a 7,0	Revestimentos (pisos e azulejos). Obs.: todos produtos de argilas não refratárias.	-	-
Faiança ( <i>Earthenware</i> )	> 10,0	Cerâmica branca não vitrificada.	> 3,0	Baixa vitrificação, cor branca ao creme, opaco, com uma textura porosa e fina

Fonte: Adaptado de Cruz *et al.* (2022).

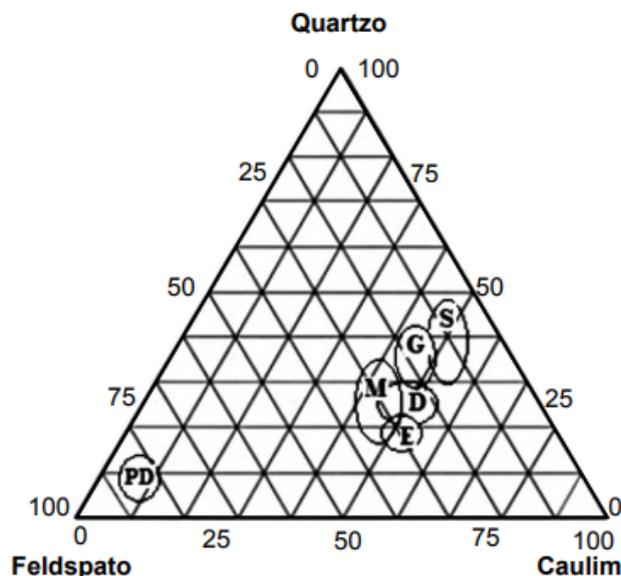
É possível observar que a norma americana tem diferenças notáveis quanto à norma europeia, em que a definição de porcelana é diferente não se baseando nas características do produto acabado, mas no processo de fabricação. Para o grês a diferença é maior, uma vez que as faixas de absorção de água aceitas para um produto ser considerado grês é consideravelmente mais ampla na norma americana, podendo até se confundir com a porcelana (absorção menor que 0,5%). Já a faiança possui características semelhantes, mas a absorção de água também é diferente entre as normas. Assim, por ter uma divisão mais clara entre os tipos de cerâmica, a norma europeia é mais utilizada no Brasil, e sabendo diferenciar as características finais de cada tipo é possível buscar entender as diferenças no processo produtivo de cada corpo cerâmico.

## 2.2. PROCESSO PRODUTIVO DA PORCELANA

### 2.2.1. Preparação de massas

Para iniciar o processo de produção da porcelana é necessário entender sobre a escolha das matérias-primas. A porcelana é considerada um material cerâmico triaxial pois é composta essencialmente de argila (é comumente utilizado o caulim como argilomineral, ou até o caulim e outro argilomineral juntos), feldspato e quartzo. Cada um desses compostos cumpre uma função, sendo a da argila fornecer plasticidade ao corpo, o feldspato forma um líquido viscoso na temperatura de queima e ajuda na vitrificação, já o quartzo é o mais refratário e se mantém estável durante a queima, tendo como função principal a estruturação (Kitouni, 2011; Kingery, 1976). Devido a essas diferenças, as composições das matérias-primas podem influenciar em diversas características dos corpos cerâmicos, fazendo com que existam aplicações diferentes da porcelana. Algumas de suas faixas de composições típicas são descritas pelo diagrama ternário mostrado na Figura 1, que se trata de um diagrama com as composições de quartzo, feldspato e caulim para fabricação de cerâmicas brancas, onde a porcelana está inserida.

Figura 1 - Diagrama ternário de composições de quartzo, feldspato e caulim. Onde D - porcelana dura, M - porcelana macia, E - porcelana elétrica, G - grês, S - cerâmica semivítrea e PD - porcelana dentária.

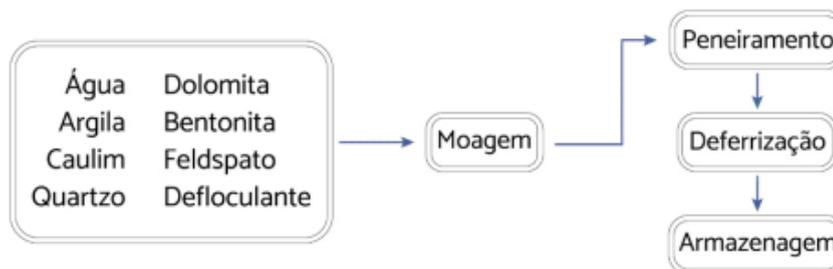


Fonte: Bragança *et al.* (2019).

O diagrama na Figura 1 mostra como alguns tipos de cerâmicas variam as composições de matéria-prima, como por exemplo, a composição clássica da porcelana dura (representada pela letra D) sendo 25% quartzo, 25% feldspato e 50% caulim (% em massa), enquanto as outras são porcelana macia (M), porcelana elétrica (E), grês (G), cerâmica semivítrea (S) e porcelana dentária (PD) (Bragança *et al.* 2019). Importante ressaltar que, além dos minerais essenciais como matéria prima, para se atingir as propriedades comerciais ideais também são utilizados aditivos como defloculantes, plastificantes, entre outros (Reed, 1995; Wang *et al.* 2022).

Após formulação das matérias primas se dá início à moagem por via úmida em um moinho de bolas, onde a mistura dos materiais com a água produz a chamada “barbotina”. O tempo de moagem pode variar em função da granulometria inicial, bem como das características finais desejadas. Assim, as propriedades que devem ser controladas na barbotina líquida são a água de moagem (pH, dureza, turbidez); distribuição granulométrica das partículas; densidade aparente; viscosidade e sólidos em suspensão. Tendo atingido as características propostas a barbotina passa por um peneiramento seguido de um processo de desferrização através de um filtro magnético para retirar quaisquer contaminações. Após isso, segue para o descarregamento e armazenamento em tanques, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 2 (Cruz *et al.* 2022).

Figura 2 - Fluxograma de preparação da barbotina.



Fonte: Cruz *et al.* (2022).

A depender do processo de conformação utilizado a barbotina pode passar por mais uma etapa chamada de atomização, onde há a presença de um atomizador em pó. Nesta etapa do processo é realizada a desumidificação parcial da barbotina, acarretando a formação de aglomerados esféricos, com características e propriedades adequadas, como o tamanho e o formato (Petrazzini, 2014).

### 2.2.2. Conformação

Dentro do processo de conformação existem alguns tipos possíveis, dentre eles são utilizados a prensagem isostática e o enchimento sob pressão. Na prensagem isostática, o material fonte é o pó atomizado da barbotina, em que a massa granulada é comprimida por meio de uma pressão exercida por uma prensa, resultando em um empacotamento e aglomeração das partículas que se conformam no formato do produto desejado pela presença de um molde. Dessa forma, busca-se garantir a melhor compactação do produto acabado, evitando possíveis defeitos, como trincas, que possam aparecer ao longo do processo produtivo (Cruz *et al.* 2022).

Já no enchimento sob pressão (ou injeção sob pressão) o material utilizado é a própria barbotina líquida, em que ela é injetada sobre a cavidade de um molde de resina porosa a uma pressão definida para cada produto. Então, da mesma forma, a barbotina injetada no molde assume o formato do produto acabado e segue para o acabamento (Reed, 1995).

As principais diferenças entre os dois tipos mencionados é que na prensagem isostática a produtividade é maior, necessitando de um menor tempo de conformação para fabricação das peças, porém, apresenta como desvantagens a necessidade de a barbotina passar pela etapa de atomização, além de funcionar com mais eficiência em produtos

simétricos. Devido a isso, os produtos assimétricos (saladeiras, travessas, entre outros) são geralmente produzidos nas máquinas de enchimento sob pressão (Reed, 1995).

Quando um produto tem sua conformação finalizada isso significa que está no formato final esperado, porém suas características ainda estão muito aquém do desejado. Isto é, a peça está em uma condição muito frágil, em que é capaz de ser quebrada pelas mãos sem muito esforço, por isso o produto passa por uma queima (Barsoum, 2019).

### 2.2.3. Queima

É na etapa de queima que as matérias-primas, em estado conformado, sofrerão as transformações necessárias para atingir as propriedades esperadas do corpo cerâmico, ocorrendo principalmente a densificação do material granulado garantindo assim um produto forte e denso (Barsoum, 2019). Para que esta etapa ocorra da forma correta, os parâmetros do forno a serem levados em consideração são as temperaturas de início e fim de reação, taxas de aquecimento, taxas de resfriamento, a atmosfera de queima e os tempos de permanência em cada patamar de temperatura. Dessa forma, é gerada a curva de aquecimento do forno. Esses parâmetros são monitorados por sensores ao longo de todo o forno, entre outros como dosadores de gás e sondas lambda para analisar os produtos da queima (Fortuna, 2000).

De uma forma geral, na primeira queima o começo do aquecimento serve para retirar a água, compostos orgânicos e voláteis que possam gerar defeitos, e finalmente, para na temperatura mais alta (chegando a aproximadamente 1200°C) ocorrer a sinterização, etapa em que as partículas se consolidam e ligam entre si formando um corpo denso. Por fim, irá passar pela curva de resfriamento que deve ser bem controlada, pois pode causar defeitos de trincas (Cruz *et al.* 2022).

O produto da primeira queima é chamado na indústria de “chacotado” e apresenta uma coloração e aspecto distante do branco e vítreo característico da porcelana, além de características superficiais também (como resistência e textura). Por essa razão é necessário revestir o produto com esmalte (Eppler, 2005).

#### **2.2.4. Esmaltação**

Na etapa de esmaltação é aplicada uma camada protetora chamada de esmalte, que consiste em uma mistura de matérias-primas, semelhantes às usadas para produzir o corpo cerâmico, com água, porém com composições distintas. O esmalte é aplicado em uma camada fina no chacoado e passa por uma segunda queima a  $\sim 1200$  °C, em que o esmalte vai fundir formando uma substância líquida vítrea que penetra os poros da superfície do produto e no resfriamento se solidifica fechando os poros.

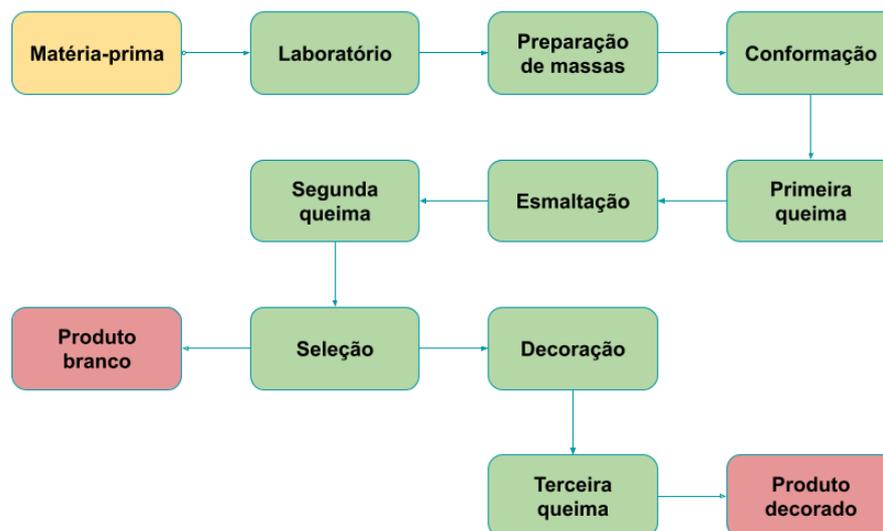
As características de um produto de porcelana esmaltado são seu aspecto vítreo e branco, textura lisa, maior resistência mecânica superficial, resistência a ataque químico e translucidez. E estas propriedades são as características técnicas e estéticas que definem o material como porcelana, portanto, todo produto deve passar pelo processo de esmaltação (Eppler, 2005).

#### **2.2.5. Decoração**

Existem alguns métodos de decoração aplicados, dentre eles: decalcomania, pulverização, filetagem e decoração digital. A decalcomania é um método de aplicação manual em que se necessita de uma mão de obra com destreza para aplicar um papel-decalque contendo a decoração que vai se ajustar na superfície da peça. Na pulverização existe uma máquina que carrega o pigmento e é operada manualmente onde o operador pulveriza com uma pistola o pigmento na superfície do prato, desenvolvendo a decoração desejada. Já na filetagem, que também é uma operação manual, o operador decora com um pincel a borda do prato com um filete (linha fina). Na decoração digital há uma máquina que recebe a arte da decoração e imprime-a na superfície do produto. Importante ressaltar que nesses métodos é necessário realizar ajustes de acordo com o formato do prato a ser decorado, sendo a decoração de modelos assimétricos mais complexa e complicada dependendo do formato (Lot *et al.* 2016).

Após todas essas etapas por diferentes métodos para fixar a decoração no prato é necessário ocorrer uma terceira queima. A Figura 3 resume o processo produtivo de uma fábrica.

Figura 3 - Fluxograma do processo produtivo da indústria de porcelana.



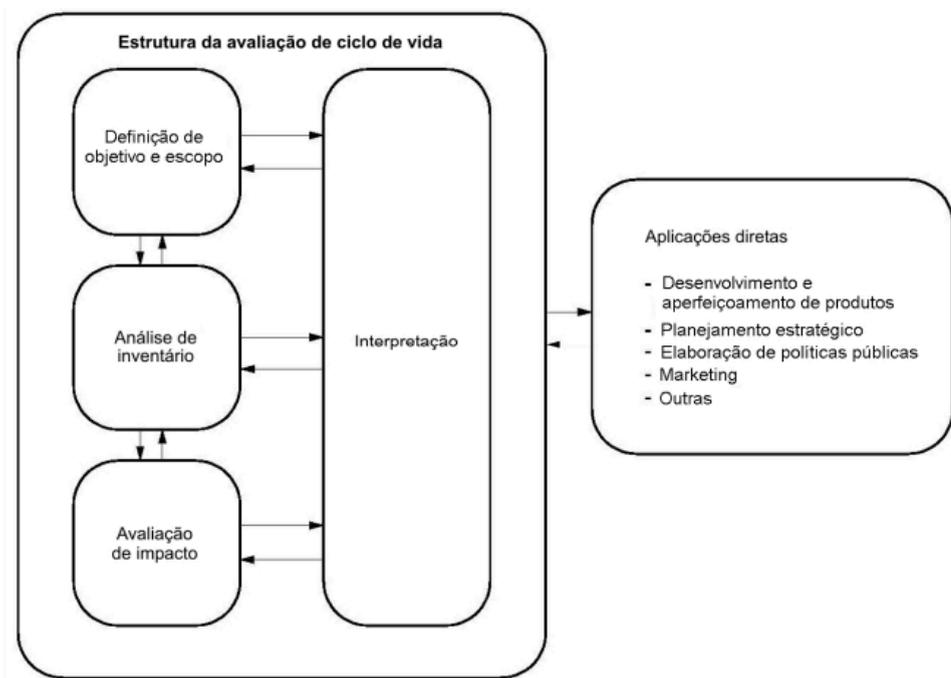
Fonte: o Autor (2025).

### 2.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A ACV é uma metodologia utilizada em todo o mundo e que no Brasil é regularizada pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). A ferramenta começou a ter mais visibilidade a partir da década de 90 quando foi criada, padronizada e incorporada às normas da International Standard Organization (ISO) em 1993 (Liu *et al.* 2024), a partir disso softwares foram criados juntamente com banco de dados que passaram a ser disponibilizados, permitindo uma maior dispersão da metodologia (Araújo, 2013). É uma ferramenta de gestão ambiental que busca identificar os possíveis pontos de melhoria no desempenho ambiental de determinado processo em todas as suas etapas. Serve tanto para diagnosticar os impactos ambientais como também serve para comparar e identificar cenários mais eficientes dentro do contexto, obtendo um resultado que otimize a geração de energia, minimize os impactos ambientais, dentre outros benefícios (Araújo, 2013; Bovea *et al.*, 2010).

De acordo com a ABNT, a ACV é dividida em quatro etapas, são essas: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. A Figura 4 mostra as relações entre as etapas.

Figura 4 - As etapas da ACV e suas aplicações.



Fonte: ABNT, 2009.

O uso da ferramenta como método de avaliar impactos ambientais nos setores de indústria cerâmica tem vasto histórico devido à diversificação de aplicação das cerâmicas e o conhecimento das grandes emissões derivadas do setor (Monteiro *et al.* 2022). Diante disto, este tipo de estudo é mais recorrente na literatura nas aplicações de revestimentos cerâmicos na indústria civil, como nos trabalhos de Vieira *et al.* (2023), Wang *et al.* (2020), Contartesi (2019). Mas a análise de ACV também é presente nas indústrias de cerâmicas sanitárias como feito por Monteiro *et al.* (2022) e Silvestri *et al.* (2019). Sobre as louças de mesa há o trabalho de Sun *et al.* (2019) comparando os impactos ambientais e melhorias utilizando a ACV em relação a diferentes tipos de materiais de artigos de jantar (plásticos descartáveis, plásticos não descartáveis, cerâmicas e de palha de trigo) mostrando como os plásticos descartáveis são responsáveis por grande maioria das emissões.

### 2.3.1. Definição do objetivo e escopo

A primeira etapa é uma fase crítica na elaboração de uma ACV, consiste em definir detalhadamente o objetivo e escopo da análise, de forma que quanto mais aprofundada essa etapa menor o risco de erros e incertezas nos resultados do estudo (Piekarski, 2015). Em

relação ao objetivo da análise, deve ser declarada a aplicação pretendida, a motivação para a execução do estudo e o público-alvo (ABNT, 2009).

Enquanto o escopo deve descrever o sistema do produto; as funções dos sistemas de produto; a unidade funcional; a fronteira do sistema; os procedimentos de alocação; metodologia de avaliação de impactos e tipos de impactos; requisitos dos dados; limitações; requisitos de qualidade dos dados; tipos de revisão crítica, se aplicáveis; tipo e formato do relatório requerido para o estudo. O escopo deve ser bem definido para assegurar que a abrangência, profundidade e detalhamento do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender ao objetivo declarado (ABNT, 2009).

O sistema do produto deve englobar os diferentes processos unitários que existem em todo o processo produtivo com suas determinadas funções, é através da análise do sistema do produto que é possível restringir o estudo do ciclo de vida determinando quais processos devem estar contidos no escopo da ACV ou não, de acordo com as necessidades descritas pelo objetivo da avaliação (Vieira, 2022).

A unidade funcional é a quantificação de uma medida a fim de padronizar e fornecer uma referência às entradas e saídas no estudo, como forma de conectá-las no inventário (Asdrubali *et al.* 2013). Tem sua maior importância quando sistemas diferentes (ou cenários diferentes de um mesmo sistema) estão sendo avaliados e devem ser comparados, sendo necessária para garantir a comparabilidade dos resultados (ABNT, 2009).

A fronteira do sistema é a etapa responsável por escolher os processos elementares que serão levados em consideração no estudo, em que uma ACV completa é chamada de “do berço ao túmulo” quando analisa desde a extração das matérias primas até a degradação/disposição final do produto (Jacquemin *et al.* 2012), enquanto uma ACV “do berço ao portão” analisa apenas até o fim do processo produtivo do objeto estudado, desconsiderando a vida útil e degradação do produto. Este é o caso da maioria dos estudos sobre cerâmicas, pois geralmente os materiais cerâmicos têm uma longa vida útil e são inertes gerando impactos ambientais muito baixos depois da manufatura e entrega ao cliente (Ros-Dosdá *et al.* 2018).

### **2.3.2. Análise de inventário de ciclo de vida**

A etapa da análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) é onde ocorre a quantificação de todas as entradas e saídas dos processos descritos no sistema do produto, reunindo

informações como insumos consumidos e gastos energéticos, bem como as emissões atmosféricas e efluentes e resíduos sólidos do processo (Kulay, 2010). Essa etapa pode ser realizada com o auxílio de banco de dados disponibilizados como Ecoinvent, Environmental Footprints, entre outros. Esses bancos de dados podem ser utilizados em conjunto com softwares como openLCA, SimaPro, GaBi, entre outros, para realização dos cálculos de balanços de massa e energia dos processos determinados (Steubing *et al.* 2020).

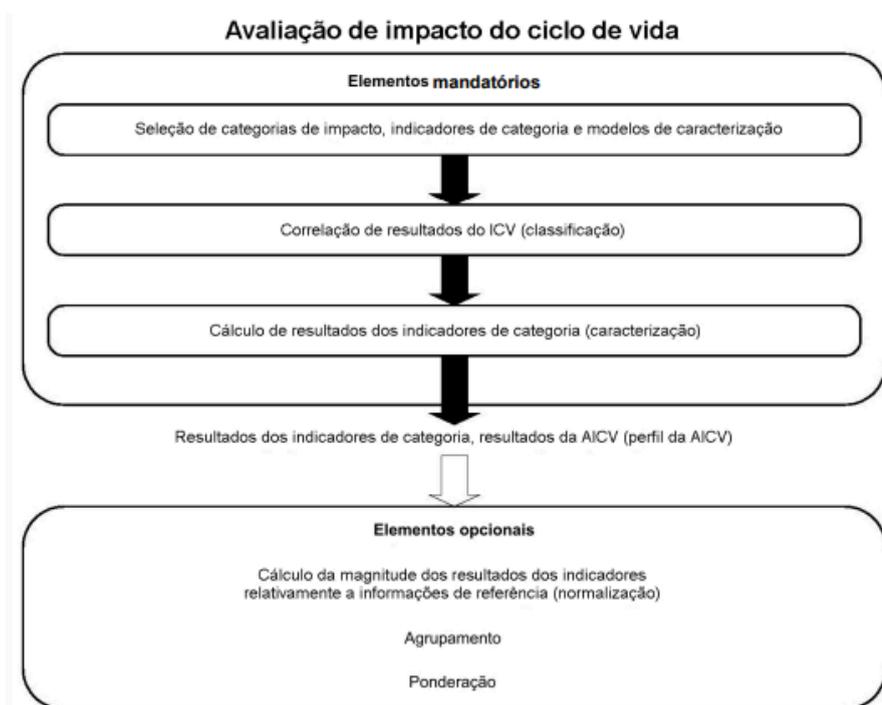
Para lidar com a grande quantidade de números de entradas e saídas referentes aos diversos processos de um sistema, é importante realizar a modelagem com auxílio de fluxogramas, descrição dos processos citados e listagem dos fluxos de entrada e saída respeitando a definição da unidade funcional. Além disso, a análise de inventário é um processo iterativo. À medida que dados são coletados, podem aparecer necessidades de mudança nos procedimentos de coleta dos dados. Inclusive, podem ser identificadas condições que precisam ser revisadas até no escopo (ABNT, 2009).

### **2.3.3. Avaliação de impactos**

A etapa de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) utiliza os resultados obtidos pela análise de ICV para avaliar os impactos ambientais do sistema estudado, utilizando de indicadores ambientais para comparar e facilitar a tomada de decisões, inclusive comparar os impactos entre diferentes etapas do processo produtivo para identificar qual a mais crítica (Vieira, 2022).

Também pode ser um processo iterativo pela análise crítica da definição do escopo e objetivo, para determinar se os objetivos foram atingidos ou, caso necessário, modificar os objetivos traçados (ABNT, 2009). A Figura 5 mostra os elementos da AICV e como se relacionam para alcançar os objetivos através de indicadores e modelos de caracterização.

Figura 5 - Elementos da fase de AICV.



Fonte: ABNT, 2009.

#### 2.3.4. Interpretação dos resultados

A Interpretação dos resultados é a última etapa de uma ACV e consiste em analisar os resultados das etapas de ICV e AICV de forma conjunta, buscando identificar os resultados significativos do estudo (Di Domenico *et al.* 2021). Deve-se notar que a finalidade desta etapa é fornecer resultados coniventes com o objetivo e escopo traçados inicialmente e que sejam suficientes para alcançar conclusões, explicar limitações e oferecer recomendações aos tomadores de decisão, lembrando o público alvo definido na primeira etapa do estudo (ABNT, 2009).

### 3. METODOLOGIA

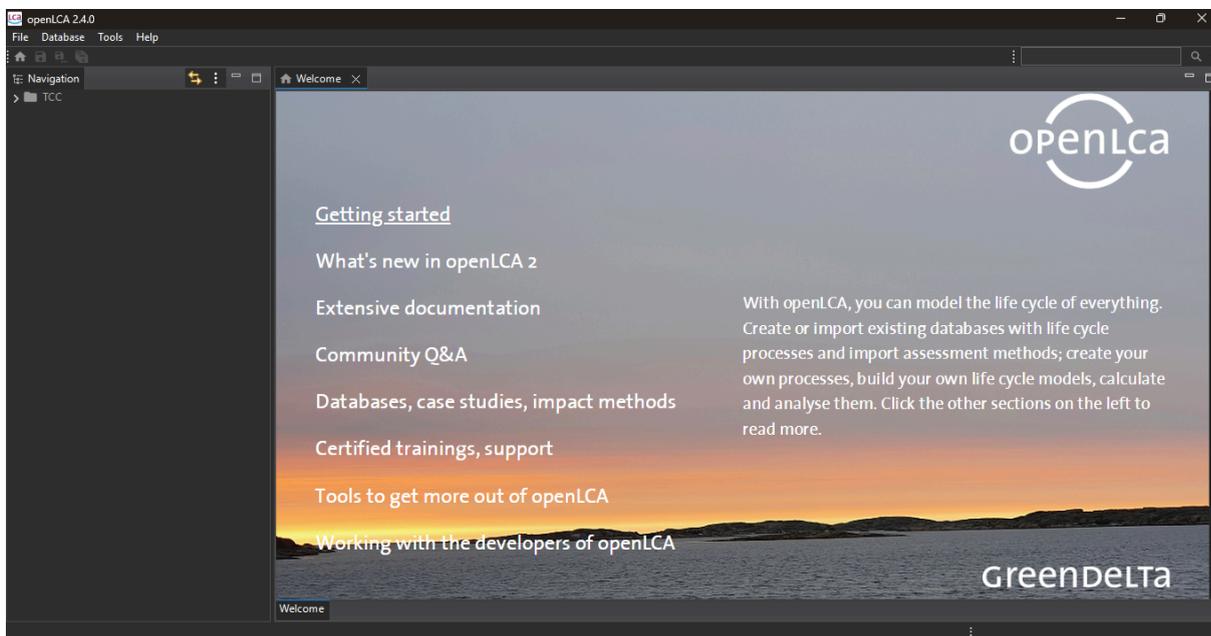
Devido a complexidade de quantificar todas as entradas e saídas de processos na prática, existe como alternativa a realização de simulações em softwares que foram criados com a intenção de realizar ACV. Onde se utiliza base de dados externas originadas a partir de pesquisas na área.

Dessa forma, o presente trabalho utiliza de simulações variando cenários de reprocessamento de refugo na formulação da massa e de eficiência do processo para comparar os impactos com a variação desses fatores.

#### 3.1. SOFTWARE

O software utilizado para a realização do presente trabalho foi o OpenLCA versão 2.4.0, programa que teve sua criação em 2006 pela empresa alemã GreenDelta, organização independente de consultoria em sustentabilidade e desenvolvimento de softwares. A tela inicial do programa está representada na Figura 6.

Figura 6 - Tela inicial do software OpenLCA 2.4.0.



Fonte: Autor (2025).

O programa foi escolhido por ser capaz de realizar avaliações de ciclo de vida tanto para modelos simples quanto para mais sofisticados de forma totalmente gratuita (OpenLCA, 2025).

### **3.1.1. Base de dados**

Para realização da ACV no programa, é necessária a utilização de uma base de dados externa que conte com informações de entradas e saídas de determinados processos. A base de dados utilizada no presente trabalho foi a *Environmental Footprints*, originada por iniciativa da União Europeia, que propôs conceber uma ferramenta capaz de auxiliar os estudos que analisem o impacto ambiental dos produtos, a fim de estabelecer uma metodologia europeia padrão para avaliá-los e rotulá-los nas Avaliações de Ciclo de Vida (*European Commission*, 2025).

## **3.2. DESENVOLVIMENTO DA ACV**

### **3.2.1. Definição do objetivo e escopo**

O objetivo definido para a avaliação do ciclo de vida é analisar os principais impactos ambientais associados ao processo produtivo da porcelana, bem como o realizar um comparativo dos impactos com processos de eficiências diferentes e com a utilização de refugo do processo na formulação das massas. O escopo do sistema será o chamado de “do berço ao portão”, isto é, envolvendo todos os processos desde a extração das matérias-primas até a fabricação do produto final, desconsiderando o transporte, consumo e a sua disposição final.

### **3.2.2. Definição dos cenários**

Foram definidos dois fatores de avaliação com quatro cenários cada, sendo assim, o primeiro fator avaliado foi a utilização de diferentes frações de refugo, isto é, perdas do processo (antes de se tornarem produtos esmaltados) que podem ser reaproveitadas na preparação das massas (Cruz *et al.* 2022). Dessa forma, as frações definidas de refugo na massa foram de 0%, 5%, 10% e 15%. Já o segundo fator analisado foi a variação da eficiência do processo produtivo para 100%, 95%, 90% e 85%.

### **3.2.3. Análise de inventário de ciclo de vida**

A análise de inventário é a etapa em que é realizada a compilação de todos os dados de entradas e saídas referentes ao sistema, etapa que é feita com o auxílio do software OpenLCA e da base de dados *Environmental Footprints*, em que já tem armazenados esses dados de diversos processos e materiais. No caso do processo produtivo da porcelana, não existia na base de dados as informações sobre este sistema em específico. Por esse motivo, durante as

simulações foi utilizado como processo de referência a fabricação de revestimentos de cerâmica, que conta com um processo de fabricação similar ao da porcelana, com diferenças na formulação das matérias primas e em alguns parâmetros de operação (como temperatura de queima) (Baby; Abraham; Rasheed, 2010). Os fluxogramas da Figura 7 mostram as semelhanças entre os dois processos.

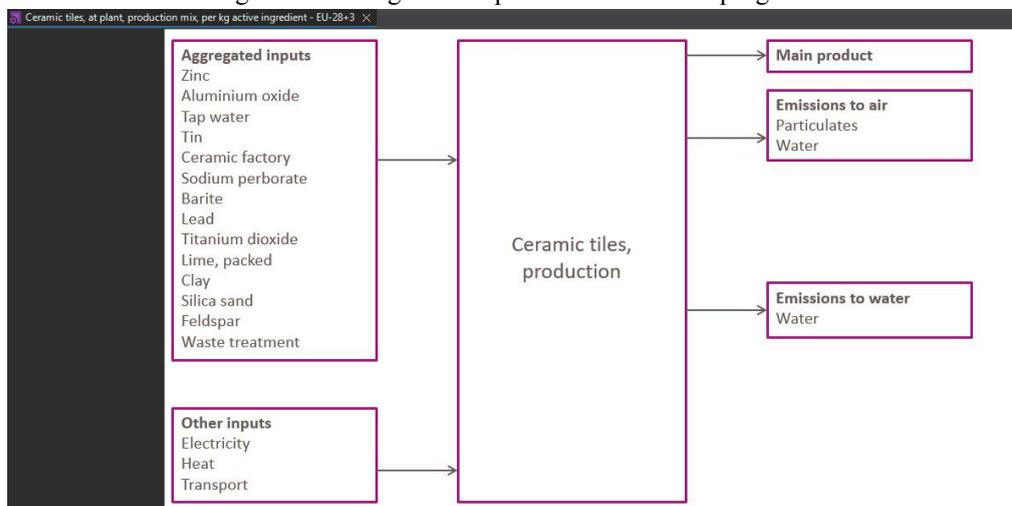
Figura 7 - Fluxogramas dos processos de fabricação de revestimentos de cerâmica e de porcelana.



Fonte: Adaptado de Baby; Abraham; Rasheed, 2010.

Dessa forma, o processo disponível na base de dados que foi utilizado contou com dados retirados da *Environmental footprints* mas também de outra base de dados, a *Ecoinvent*, além de ter sido revisado pela Quantis, consultoria internacional líder em sustentabilidade ambiental (Quantis, 2025). Assim, é possível observar na Figura 8 o fluxograma que descreve como é o processo no *software*, com o bloco central representando todo o processo de fabricação de forma condensada e os outros blocos representando suas entradas e saídas do sistema, finalizando com o produto final.

Figura 8 - Fluxograma do processo descrito no programa



Fonte: Autor (2025).

Pode-se analisar que esse bloco não está considerando nem o processo de extração das matérias primas nem o descarte final do produto, ou seja, para se tornar um sistema do “berço ao portão” é necessário acrescentar a etapa das obtenções das matérias primas.

Então para dar prosseguimento às simulações dos cenários envolvendo a eficiência do processo foi fixada a quantidade desejada (unidade funcional) como 1000kg de revestimentos cerâmicos produzidos.

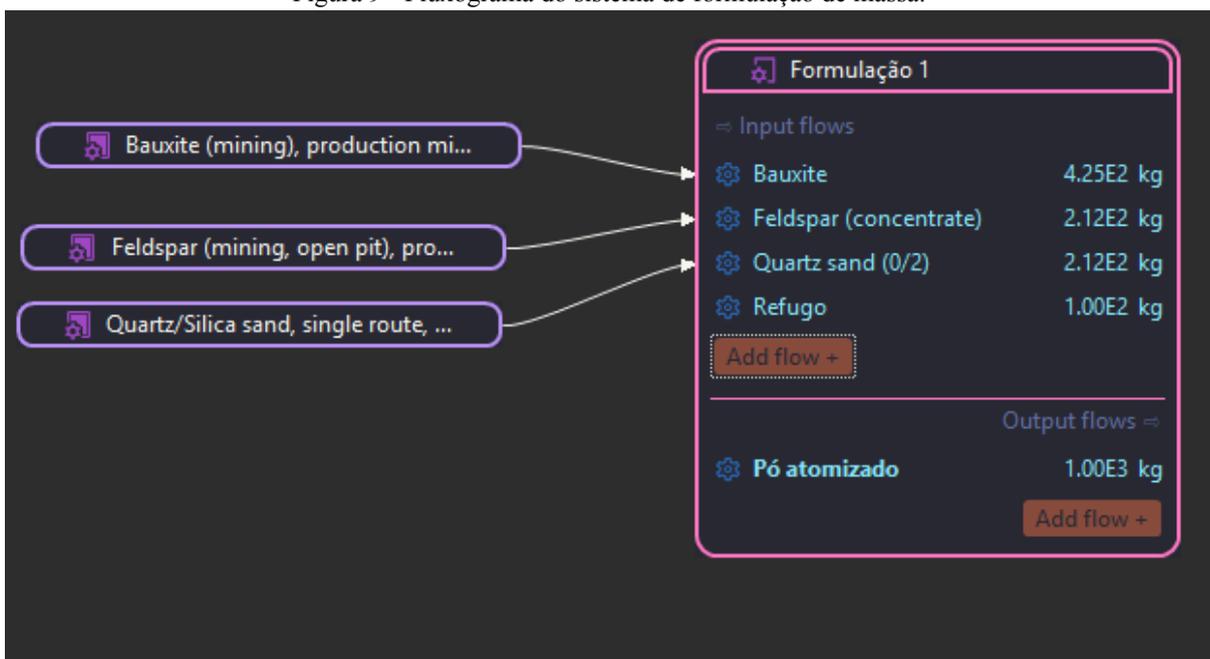
Portanto, para calcular as variações de eficiência foi necessário calcular a massa produzida de acordo com a eficiência desejada. Isto é, considerando que o *software* entende que o processo descrito é 100% eficiente na base de dados. Dessa forma, foram realizadas as simulações alterando a massa produzida utilizando a Equação 1, para que se entenda que ao fim daquele processo teriam 1000 kg de revestimentos cerâmicos produzidos.

$$m_{estimada} = m_{final} \div \eta \quad (1)$$

Onde:  $m_{estimada}$  (kg) vai ser a saída da simulação no software,  $\eta$  é a eficiência e  $m_{final}$  é a massa realmente desejada de 1000 kg.

Para os cenários envolvendo a utilização do reprocessamento de refugo na formulação da massa foi necessário criar um sistema chamado “Formulação da massa” no qual são combinadas as matérias primas utilizadas no processo, considerando a composição da porcelana dura de acordo com Bragança *et al.* (2019), sendo caulim, feldspato e quartzo com composições de 50%, 25% e 25%, respectivamente. Considerando os processos que constam na base de dados *Environmental Footprints*, o que foi possível para o feldspato e o quartzo, porém para o caulim o processamento disponível na base de dados se tratava do processo de beneficiamento do caulim por via úmida, processo composto por uma série de métodos de beneficiamento complexos que têm custos maiores, produtos de qualidade maior e emissões consideravelmente maiores do que o processamento por via seca (Murray, 1980; Prasad, Reid, Murray; 1991). Por essa razão, como não havia o processamento do caulim por via seca, o processo de extração disponível na base de dados utilizado para substituir o caulim foi o da bauxita. A escolha da bauxita se deu por ser, juntamente do caulim, um minério de alumínio e ter processos de obtenção semelhantes, sendo inclusive comum encontrá-los misturados nos produtos da extração (Vieira, 2011; Goldman, Tracey Jr; 1946). Com essa condição se resulta no fluxograma mostrado na Figura 10.

Figura 9 - Fluxograma do sistema de formulação de massa.



Fonte: Autor (2025).

O refugo não precisa de um processo de entrada pois entende-se que não tem gastos envolvidos no reprocessamento dos mesmos, uma vez que não é necessário tratamento algum para poder utilizar essas aparas na formulação das massas, apenas inserir no moinho/misturador junto com as demais matérias primas (Cruz *et al.* 2022).

O percentual de refugo ( $p_{\text{refugo}}$ ) desejado altera a massa de todas as matérias primas de acordo com as Equações 2, 3, 4 e 5 a seguir.

$$m_{\text{caulim}} + m_{\text{feldspato}} + m_{\text{quartzo}} + m_{\text{refugo}} = 1000 \text{ kg} \quad (2)$$

$$m_{\text{refugo}} = p_{\text{refugo}} \times 1000 \text{ kg} \quad (3)$$

$$m_{\text{feldspato}} = m_{\text{quartzo}} \quad (4)$$

$$m_{\text{caulim}} = 2m_{\text{feldspato/quartzo}} \quad (5)$$

### 3.2.4. Avaliação de impactos

A fase de avaliação dos impactos tem como objetivo converter os resultados da avaliação em informações úteis para a interpretação dos resultados e tomadas de decisão

(Finnveden; Lindfors, 1996). Existem diversas categorias de impactos ambientais consideradas na literatura, bem como várias metodologias utilizadas para realizar essa etapa de avaliação dos impactos, sendo assim possível observar que diferentes trabalhos de ACV têm pequenas variações nos resultados analisados e nas metodologias utilizadas (Khasreen; Banfill; Menzie, 2009).

Dessa forma, a metodologia de avaliação de impactos utilizada foi a da própria base de dados, *Environmental Footprint (Mid-point indicator)*, e os impactos ambientais considerados para esta metodologia são:

- Acidificação;
- Mudanças climáticas;
- Ecotoxicidade;
- Eutrofização;
- Toxicidade humana;
- Radiação ionizante;
- Uso da terra;
- Destruição da camada de ozônio;
- Materiais particulados;
- Formação fotoquímica de ozônio;
- Uso de recursos fósseis e minerais/metálicos;
- Consumo de água.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. PRINCIPAIS IMPACTOS AMBIENTAIS DO PROCESSO

Com os blocos no sistema montados para cada cenário, as simulações no OpenLCA foram realizadas e assim foram gerados os cálculos dentro da base de dados para identificar e quantificar os principais impactos ambientais decorrentes do processo. Dessa forma, nota-se no Apêndice A que para os dois fatores diferentes analisados existiram cinco impactos ambientais que se destacaram mais do que os demais existentes na metodologia, foram estes: uso de recursos fósseis, mudanças climáticas, uso da terra, consumo de água e ecotoxicidade.

Os resultados do caso base de formulação de massa para o processo sem o reprocessamento do refugo estão representados pela Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos impactos ambientais do processo de formulação da massa.

<b>Impacto ambiental</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Uso da terra	202	Pt
Uso de recursos fósseis	42,7	MJ
Consumo de água	10,2	m <sup>3</sup>
Mudança climática	3,39	kg CO <sub>2</sub> eq
Ecotoxicidade	0,945	CTUe

Fonte: Autor (2025).

Onde a unidade do uso da terra “Pt” é uma unidade adimensional baseada no modelo LANCA como um tipo de normalização que unifica fatores como resistência à erosão, filtração mecânica, regeneração de águas subterrâneas e produção biótica (De Laurentiis *et al.* 2019); a unidade do uso de recursos fósseis é megajoule (MJ), referente ao gasto de energia na utilização desses recursos; a unidade de mudança climática é o equivalente de quilogramas de CO<sub>2</sub> liberados no ar e o consumo de água é medido em metro cúbico. Por último, a unidade da ecotoxicidade, CTUe, significa unidade tóxica comparativa e de acordo com Rey-Álvarez *et al.* (2024) é representada pela Equação 6.

$$CTU_e = PAF \times m^3 \times dia \quad (6)$$

Onde PAF é a sigla para fração de espécies potencialmente afetadas.

Já os resultados do caso base do processo de fabricação (considerando 100% de eficiência) de revestimentos cerâmicos são representados pela Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos impactos ambientais do processo de fabricação.

<b>Impacto ambiental</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Uso da terra	211,5	Pt
Uso de recursos fósseis	54,25	MJ
Consumo de água	10,45	m <sup>3</sup>
Mudança climática	4,162	kg CO <sub>2</sub> eq
Ecotoxicidade	2,079	CTUe

Fonte: Autor (2025).

O impacto de uso da terra está relacionado às grandes áreas utilizadas para os complexos industriais, as áreas de instalação de minas para obtenção das matérias-primas e as áreas florestais de onde são extraídas as madeiras das árvores (normalmente Eucalipto) para produção do papelão utilizado nas embalagens (Vieira, 2022).

O uso de recursos fósseis está entre os principais impactos devido à alta utilização de gás natural, em que cerca de 92% da demanda energética de todo o processo é referente à energia térmica proveniente da queima de gás natural (Monfort *et al.* 2010). Além disso, em 2014 a indústria cerâmica correspondeu a 5,8% de todo o consumo energético do setor industrial do Brasil com cerca de 5,09 milhões toe, unidade que significa tonelada de petróleo equivalente (ton of oil equivalent), isto é, quantidade de energia liberada na queima de uma tonelada de petróleo bruto (Ciacco; Rocha; Coutinho, 2017). Importante ressaltar que segundo Gielen (1997) os diferentes tipos de cerâmicas têm diferentes consumos de energia nos seus processos produtivos, como mostrado na Tabela 4.

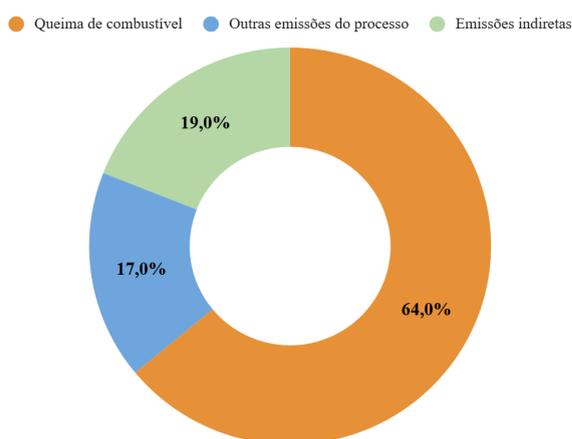
Tabela 4 - Consumo de energia por unidade de peso para diferentes tipos de produtos cerâmicos.

<b>Tipo de produto cerâmica</b>	<b>Consumo de energia (GJ/t)</b>
Revestimentos não esmaltados	6
Revestimentos esmaltados	7
Louças de grês	10
Sanitários de grês	30
Louças finas (porcelana)	70

Fonte: Adaptado de IEA (2007).

Já a mudança climática é um dos principais impactos devido à emissão de CO<sub>2</sub> decorrente do processo que sabe-se que é elevado, uma vez que se estima que as emissões do setor industrial cerâmico do mundo todo totaliza mais de 400 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (IEA, 2007), enquanto na Europa o setor cerâmico totaliza uma emissão de 19 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente (Cerame-Union, 2021). Essa alta emissão de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionada com o alto consumo do gás natural como combustível nos processos de queima, atomização e secagem. Em que em 2020 essa parcela representou 64% de toda emissão do setor em 2020 (Cerame-Union, 2021), como mostrado na Figura 11. Enquanto na ACV realizada por Vieira (2022) 69% das emissões que causam o impacto ambiental da mudança climática foram decorrentes da queima de combustível utilizado no processo.

Figura 10 - Divisão das fontes de emissão de CO<sub>2</sub> no processo.



Fonte: Adaptado de Cerame-Union (2021).

O impacto de consumo de água na indústria cerâmica tem sua maior contribuição nas etapas de preparação das massas, tanto na produção da barbotina (e posteriormente o pó atomizado para conformação) quanto na produção do esmalte, sendo a água o principal insumo utilizado para estas etapas (Lo Giudice *et al.* 2017).

Segundo Vieira (2022) a maior fração do impacto de ecotoxicidade é referente à utilização dos papelões no processo de classificação e embalagem, tanto para divisórias quanto para caixas. E a questão é que para a fabricação do papelão é necessária a utilização de madeiras de árvores como eucalipto, e durante seu cultivo são utilizados fertilizantes e/ou pesticidas que podem contar com ácido sulfúrico na sua composição e principalmente no seu processo produtivo. Dessa forma afeta a ecotoxicidade, principalmente a terrestre (Borrion; Khraisheh; Benyahia, 2012).

A Tabela 5 mostra um comparativo entre os impactos nos dois casos base.

Tabela 5 - Comparação dos impactos dos casos sem refugo e com 100% de eficiência.

Cenário	Uso da terra (Pt)	Uso de recursos fósseis (MJ)	Consumo de água (m <sup>3</sup> )	Mudança climática (kg CO <sub>2</sub> eq)	Ecotoxicidade (CTUe)
1.1	202,3	42,67	10,23	3,383	0,945
2.1	211,5	54,25	10,45	4,152	2,079
Diferença percentual	4,35%	21,35%	2,09%	18,52%	91,20%

Fonte: Autor (2025).

Percebe-se que o impacto mais afetado pelo processo produtivo proporcionalmente é a ecotoxicidade, comprovando que sua contribuição se dá devido o uso de papelão e derivados nas embalagens e divisórias utilizadas no processo (Vieira, 2022) mas na extração das matérias primas é um impacto desprezível. Enquanto o que mais aumenta em valor absoluto é o uso de recursos fósseis, explicado pela alta demanda de gás natural nos processos de queima (Monfort *et al.* 2010).

#### 4.2. CENÁRIOS VARIANDO O PERCENTUAL DE REFUGO NA MASSA

Após ver os impactos da diminuição de eficiência do processo, nota-se que o material que seria descartado pela baixa eficiência pode ser reincorporado na formulação. Portanto, foram avaliados os cenários variando o percentual de refugo utilizado na formulação da massa. A Tabela 6 indica as massas que foram utilizadas nas simulações de cada cenário.

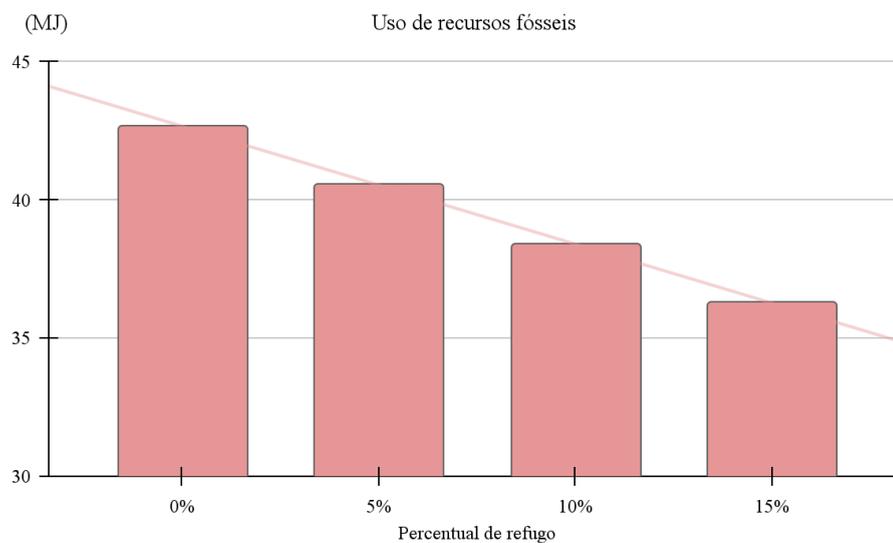
Tabela 6 - Massas utilizadas nos cenários.

Cenário	Percentual de refugo	m <sub>caulim</sub> (kg)	m <sub>feldspato</sub> (kg)	m <sub>quartzo</sub> (kg)	m <sub>refugo</sub> (kg)
1.1	0%	500	250	250	0
1.2	5%	475	237,5	237,5	50
1.3	10%	450	225	225	100
1.4	15%	425	212,5	212,5	150

Fonte: Autor (2025).

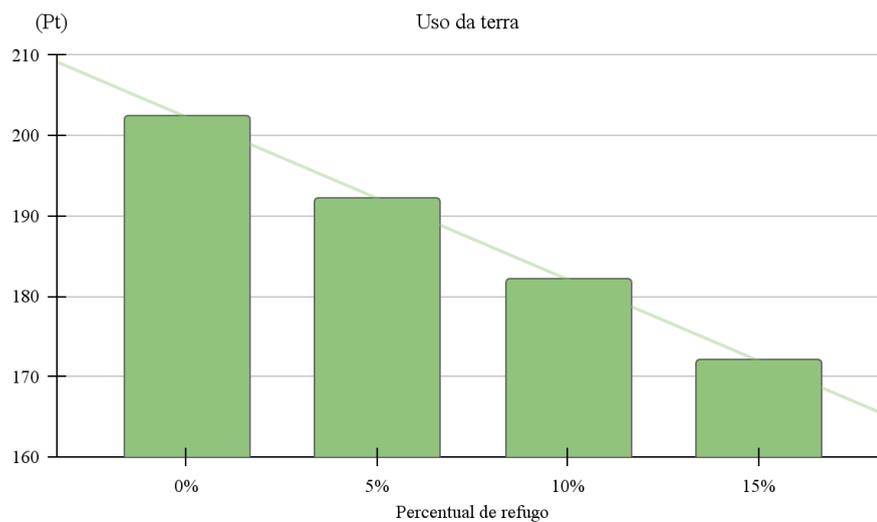
A partir dessas quantidades estimadas as simulações foram realizadas e nas Figura 11, 12 e 13 estão os resultados dos impactos ambientais: uso de recursos fósseis, uso de terra, mudança climática.

Figura 11 - Comparação do uso de recursos fósseis variando o percentual de refugo.



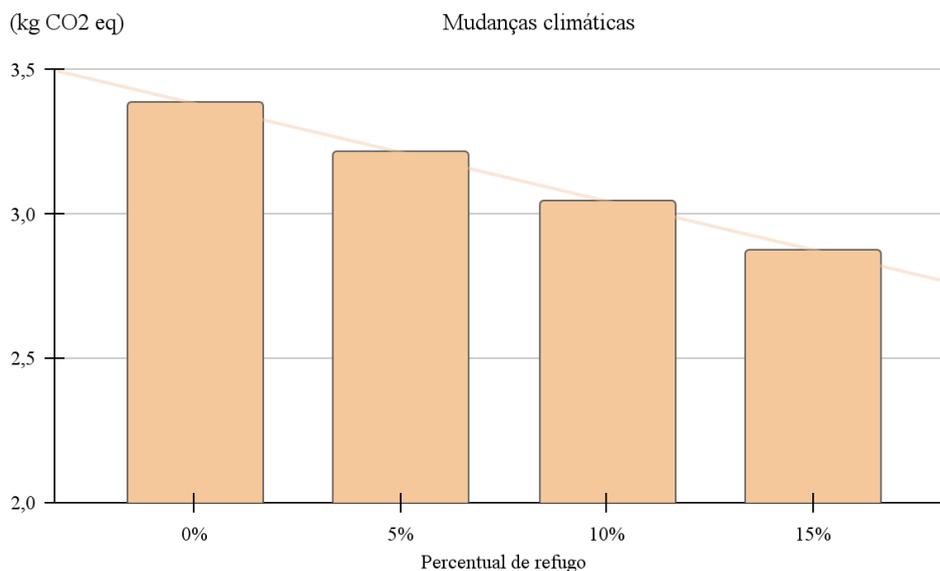
Fonte: Autor (2025).

Figura 12 - Comparação do uso da terra variando o percentual de refugo.



Fonte: Autor (2025).

Figura 13 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando o percentual de refugo.



Fonte: Autor (2025).

De maneira oposta aos cenários com variação na eficiência, para o percentual de refugo a tendência é de uma redução linear dos impactos ambientais causados à medida que o percentual de refugo utilizado na massa aumenta. Isso se explica pelo fato de que o reprocessamento dessas perdas serve como um fator que diminui as quantidades de matérias-primas virgens utilizadas na formulação da massa, assim retirando parte dos impactos ambientais causados pela extração das mesmas. A Tabela 7 mostra as reduções subsequentes dos impactos ambientais comparados com o cenário base sem utilização de refugo na massa.

Tabela 7 - Redução percentual dos impactos (variando percentual de refugo).

Cenário	Redução percentual dos impactos
1.1	-
1.2	5,00%
1.3	10,00%
1.4	15,00%

Fonte: Autor (2025).

Existem estudos que buscam reaproveitar ou reciclar resíduos da indústria cerâmica para reduzir os impactos ambientais, sejam os resíduos finais (tratados na estação de tratamento de efluentes da indústria) ou os refugos do processo (queimados ou não), como os de Andreola *et al.* (2016), Rambaldi (2021), Medri e Landi (2014), Ocampo e González (2023).

Bernasconi *et al.* (2025) analisou a utilização do refugo de produtos “chacotados” na formulação de barbotina de louça vítrea, cerâmica muito semelhante à porcelana (Cruz *et al.* 2022), variando o percentual utilizado na massa e acompanhando as etapas de produção para analisar as propriedades do corpo cerâmico. Os resultados mostraram que a reutilização de refugo na formulação da barbotina cerâmica foi viável, pois não afetou a maioria das propriedades tecnológicas do corpo cerâmico após a queima e manteve praticamente inalteradas as características reológicas da barbotina, o que está de acordo com os resultados relatados por Silva *et al.* (2019). Os resultados de Bernasconi *et al.* (2025) indicam a possibilidade de reutilizar refugo em até 20% da massa, um valor que está alinhado com os resultados apresentados por Tarhan *et al.* (2017).

Outra preocupação que deve-se ter é que para a incorporação do refugo chacotado na massa cerâmica, é essencial que ele tenha sido queimado a uma temperatura igual ou superior à da queima que a nova massa terá. Devido à sua inércia química e estabilidade térmica, o chacotado proporciona um comportamento dilatométrico mais uniforme, tornando o material mais resistente às variações térmicas (Cruz *et al.* 2022). Dessa forma, há uma redução na deformação piropástica, porém o efeito tecnológico pode ser benéfico, pois a redução dessa deformação permite o design de formas cerâmicas mais complexas, com menos restrições para evitar falhas no corpo cerâmico (Bernasconi *et al.* 2025).

Além disso, sua presença na formulação facilita a secagem das peças, reduzindo a retração e aumentando a porosidade, o que ajuda a prevenir defeitos nesse processo (Cruz *et al.* 2022).

Importante ressaltar que nesses estudos a quantidade de caulim utilizada na massa não foi alterada nas variações, sendo o refugo utilizado para substituir apenas o feldspato e quartzo, uma vez que o caulim é o componente majoritário da massa da porcelana e é o responsável pela plasticidade do corpo, então qualquer alteração na sua composição pode afetar essa propriedade. Porém para um processo contínuo é mais vantajoso inserir o refugo substituindo todos os componentes da massa, então nesses casos deve-se utilizar um percentual de refugo menor por causa do caulim (Karamanov *et al.* 2006).

#### 4.3. CENÁRIOS VARIANDO A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO

Para a realização da comparação dos cenários variando eficiência do processo primeiramente foram calculadas as massas estimadas para cada cenário a fim de saber as quantidades estimadas que refletem a necessidade de atender uma demanda de produção de 1

ton de produto, considerando que a perda de eficiência impacta na necessidade de produzir além do mínimo necessário. A Tabela 8 indica as massas que foram utilizadas nas simulações de cada cenário.

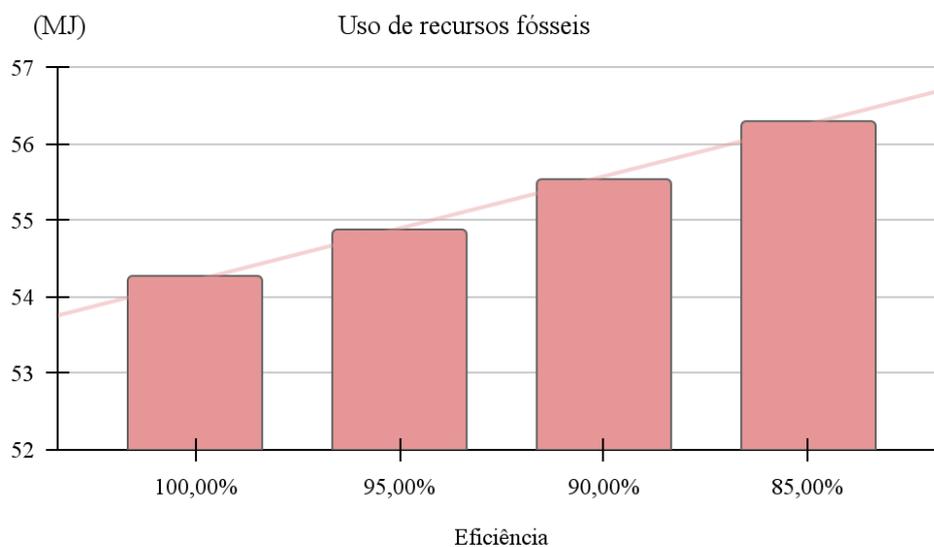
Tabela 8 - Massas utilizadas nos cenários variando a eficiência.

Cenário	Eficiência	Massa estimada(kg)
2.1	100%	1000,00
2.2	95%	1052,63
2.3	90%	1111,11
2.4	85%	1176,47

Fonte: Autor (2025).

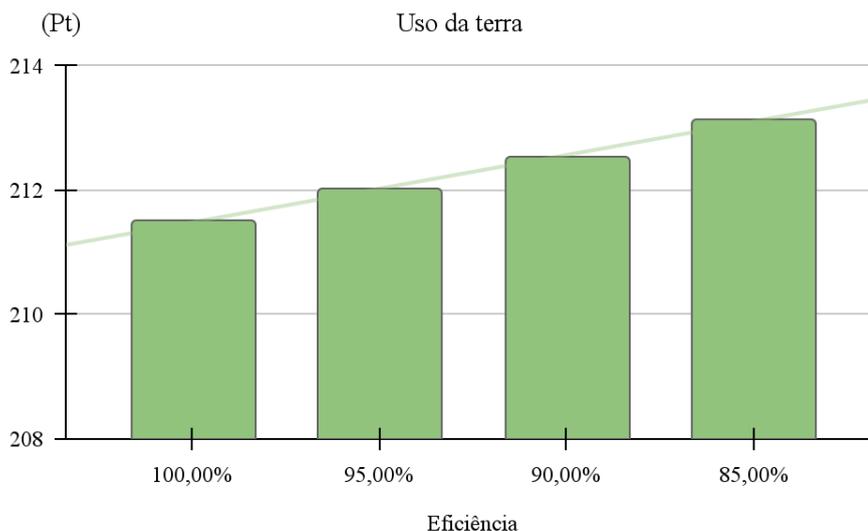
A partir dessas quantidades estimadas as simulações foram realizadas e nas Figura 14, 15 e 16 estão os resultados dos impactos ambientais: uso de recursos fósseis, uso de terra, mudança climática.

Figura 14 - Comparação do uso de recursos fósseis variando a eficiência do processo.



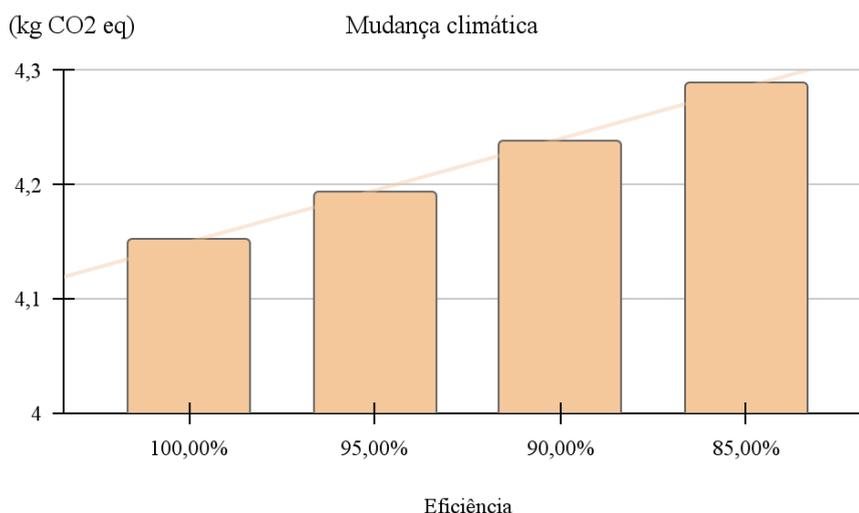
Fonte: Autor (2025).

Figura 15 - Comparação do uso da terra variando a eficiência do processo.



Fonte: Autor (2025).

Figura 16 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando a eficiência do processo.



Fonte: Autor (2025).

É possível observar uma tendência esperada de aumento nos impactos obtidos à medida que a eficiência diminui, pois dessa maneira para se atingir o mesmo objetivo é necessário mais matérias-primas e assim todo o processo vai ser mais exigido. Os impactos tiveram aumentos percentuais diferentes entre si, pois os aumentos foram de acordo com impacto do processo de fabricação apenas, uma vez que as matérias-primas estão fixadas. A Tabela 9 mostra os aumentos dos impactos se comparados com o processo 100% eficiente.

Tabela 9 - Aumento percentual dos impactos (variação da eficiência).

<b>Cenário</b>	<b>Uso da terra</b>	<b>Uso de recursos fósseis</b>	<b>Consumo de água</b>	<b>Mudança climática</b>	<b>Ecotoxicidade</b>
2.1	-	-	-	-	-
2.2	0,23%	1,12%	0,11%	0,97%	2,87%
2.3	0,48%	2,37%	0,23%	2,06%	6,06%
2.4	0,77%	3,77%	0,37%	3,26%	9,63%

Fonte: Autor (2025).

Existem inúmeras possibilidades de origem de defeitos nas etapas da fabricação de produtos de porcelana que podem atrapalhar a eficiência do processo. Defeitos de contaminações da massa que podem ocorrer nas etapas iniciais da produção, defeitos decorrentes de parâmetros mal dimensionados que podem ser da moagem da preparação da massa até a última queima, além de defeitos ocasionados por mal manuseio dos produtos e demais falhas operacionais (Cruz *et al.* 2022). Assim, nota-se a importância da atuação de um setor de Qualidade operacional a fim de buscar resolver as dificuldades que processo pode ter para não perder eficiência, importante tanto economicamente quanto ambientalmente (Ciacco; Rocha; Coutinho, 2017).

Da mesma forma, existem alternativas estudadas para aumentar a eficiência energética do processo, uma vez que a maior fonte de impactos ambientais é o consumo de gás natural no sistema em seu total (Vieira, 2023). O desenvolvimento de fornos de maior eficiência térmica é um tópico que deve ser priorizado pois fornos contínuos a gás natural, os mais utilizados nesse tipo de processo, apresentam uma eficiência energética apenas de 5 a 20%, o restante é perdido através dos dutos de saídas do ar de resfriamento (30–35%), os dutos de saídas dos gases de combustão e ar quente (20–25%), paredes e teto do forno (10–15%) e através dos produtos queimados (5–10%). (Ferrer *et al.* 2019). A fim de contornar isso existem estudos de recirculação e recuperação do calor de resfriamento perdido no processo, como os de Inostroza(2013), Ferrer *et al.*(2019) e Mezquita *et al.*(2014), que chegaram a resultados positivos de um aumento de cerca de 17% da eficiência energética reaproveitando o ar de resfriamento que seria perdido para aquecer o próprio ar de aquecimento do forno e também águas de caldeiras. O melhor aproveitamento do calor perdido do forno depende de diversos fatores, desde o espaço na fábrica para a instalação de tubulações de recirculação, até cálculos precisos das alternativas para determinar qual o melhor rendimento. A redução

estimada para a recuperação indireta, em um forno novo, é de 500-700 toneladas de CO<sub>2</sub>/ano (Cruz *et al.* 2022).

#### 4.4. CENÁRIO DE INTEGRAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA DO PROCESSO E INCORPORAÇÃO DE REFUGOS

A fim de comparar os aumentos e reduções dos impactos ambientais envolvidos com a perda de eficiência do processo e com o uso de refugo na formulação da massa foram realizados os cálculos dos impactos ambientais integrando a massa de refugos produzida pela queda na eficiência como matéria-prima na formulação. Ou seja, foram criados novos cenários em que neles ocorre a variação simultânea da eficiência do processo e do percentual de refugo na massa. A Tabela 10 mostra como ficaram esses novos cenários.

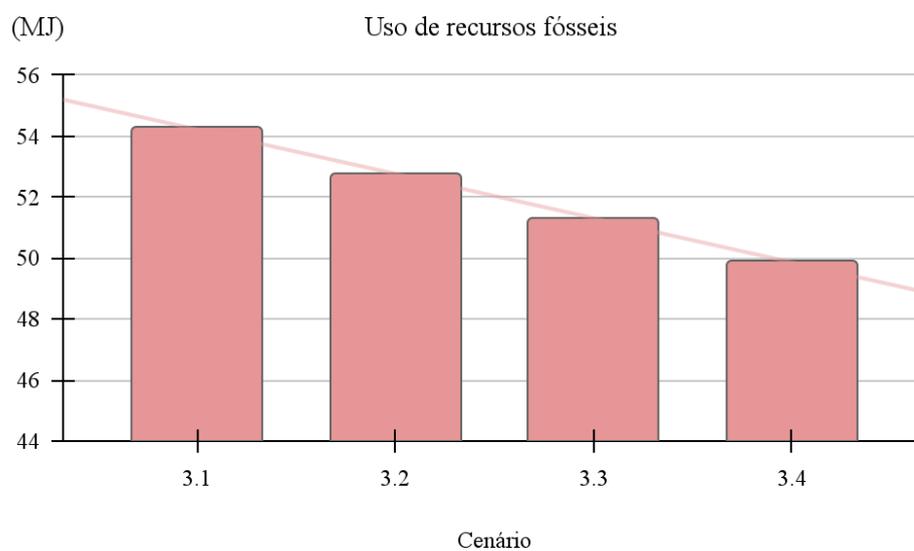
Tabela 10 - Cenários integrados.

<b>Cenário</b>	<b>Eficiência</b>	<b>Percentual de refugo</b>
3.1	100,00%	0,00%
3.2	95,00%	5,00%
3.3	90,00%	10,00%
3.4	85,00%	15,00%

Fonte: Autor (2025).

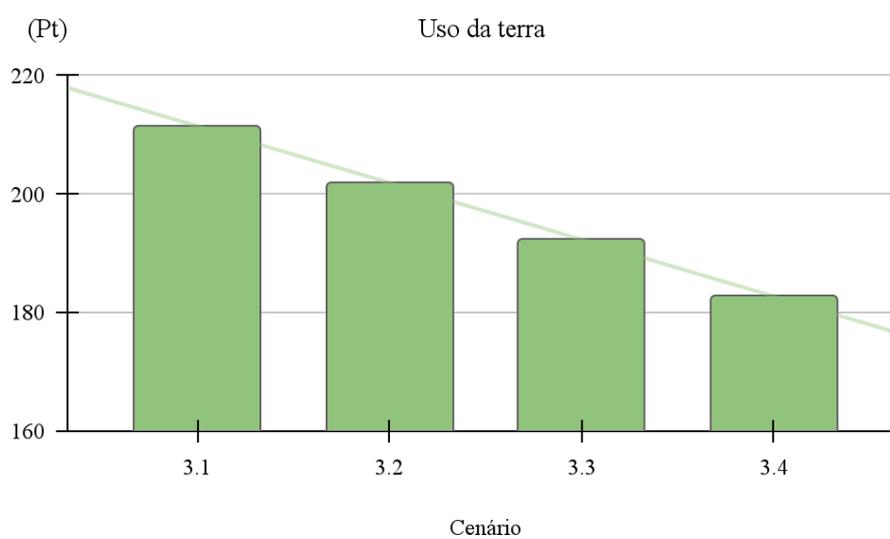
A partir disso, na Figura 17, 18, 19, 20 e 21 estão os resultados, para cada cenário, dos impactos ambientais: uso de recursos fósseis, uso de terra, mudança climática, consumo de água e ecotoxicidade.

Figura 17 - Comparação do uso de recursos fósseis variando os cenários.



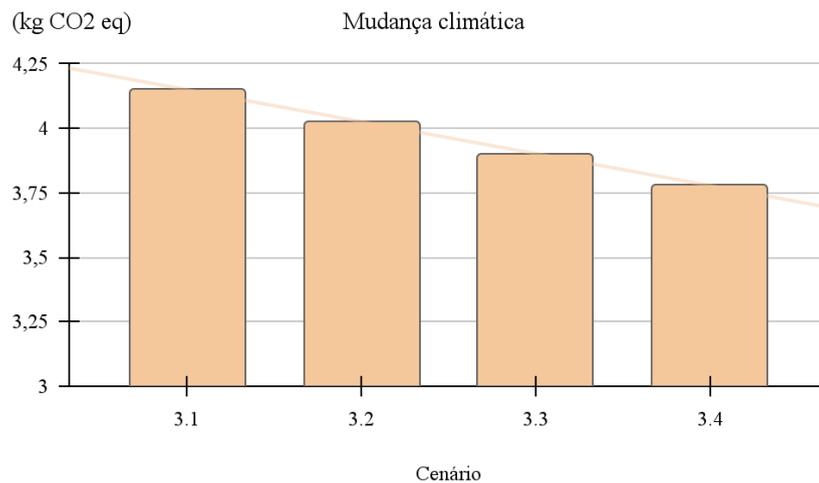
Fonte: Autor (2025).

Figura 18 - Comparação do uso da terra variando os cenários.



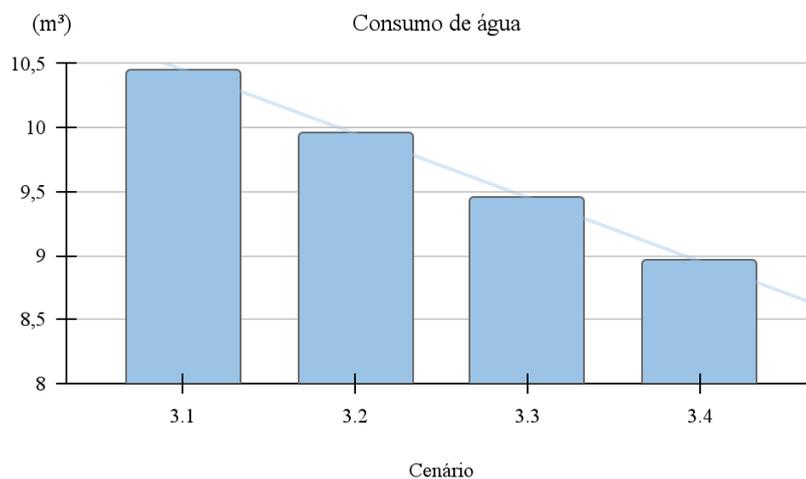
Fonte: Autor (2025).

Figura 19 - Comparação do impacto de mudanças climáticas variando os cenários.



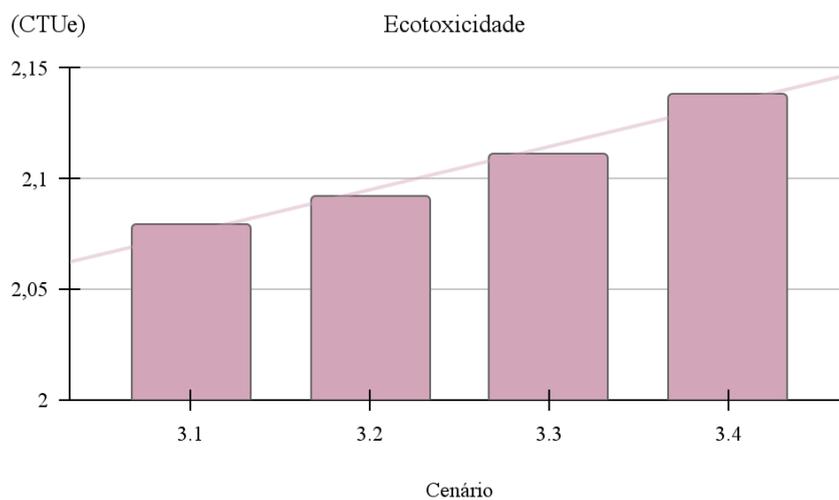
Fonte: Autor (2025).

Figura 20 - Comparação do consumo de água variando os cenários.



Fonte: Autor (2025).

Figura 21 - Comparação da ecotoxicidade variando os cenários.



Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que os principais impactos diminuem de acordo com o aumento do percentual de refugo, mesmo com a eficiência de processo menor. Isso confirma o resultado do trabalho de Vieira (2022), que mostra como a etapa de preparação de massa é a etapa com maior colaboração nos impactos ambientais do sistema produtivo, especialmente devido aos processos de extração das matérias-primas. O único impacto que não seguiu a mesma tendência foi o de ecotoxicidade pois o fator que mais contribui para esse impacto é a utilização de papelão nos processos de classificação e embalagem dos produtos na indústria devido ao uso de pesticidas no solo para a área de floresta (Borrion; Khraisheh; Benyahia, 2012), dessa forma, não sendo relacionado com as matérias-primas utilizadas.

A Tabela 11 mostra as diferenças percentuais entre os cenários, comparado com o cenário base de 100% de eficiência e 0% de refugo na massa.

Tabela 11 - Diferença percentual dos impactos (variando eficiência e percentual de refugo).

<b>Cenário</b>	<b>Uso da terra</b>	<b>Uso de recursos fósseis</b>	<b>Consumo de água</b>	<b>Mudança climática</b>	<b>Ecotoxicidade</b>
3.1	-	-	-	-	-
3.2	-4,55%	-2,81%	-4,79%	-3,10%	0,60%
3.3	-9,08%	-5,49%	-9,56%	-6,09%	1,52%
3.4	-13,58%	-8,03%	-14,32%	-8,96%	2,82%

Fonte: Autor (2025).

Assim, é mostrado que, desconsiderando a ecotoxicidade, o uso de recursos fósseis e mudança climática foram os impactos que menos reduziram com o aumento do percentual de refugo, demonstrando que fração importante desses impactos são advindos do processo de fabricação, mais especificamente das queimas realizadas por conta da alta demanda de gás natural ser o fator chave para esses impactos (Monfort *et al.* 2010).

## 5. CONCLUSÃO

A (ACV) neste estudo se mostrou uma ferramenta útil para identificar os principais impactos ambientais associados ao processo industrial da porcelana. Os resultados demonstraram que os maiores impactos estão relacionados ao elevado consumo de gás natural, tornando o processo uma grande fonte de emissões associadas ao aquecimento global e exploração de recursos fósseis, com cerca de 4,15 kg CO<sub>2</sub>eq emitidos e 54,25 MJ de energia térmica proveniente da queima de gás natural utilizada para produzir uma tonelada de produto.

Diante disso, fica evidente a necessidade de tornar a produção de porcelana mais eficiente, reduzindo desperdícios e minimizando impactos ambientais. A otimização do processo industrial pode ser alcançada por meio do aprimoramento dos controles de qualidade, evitando não conformidades que comprometam o aproveitamento dos materiais e levem ao descarte de produtos.

Além disso, medidas para aumentar a eficiência térmica dos fornos surgem como alternativas viáveis para mitigar esses impactos. Tecnologias como a recirculação do ar de resfriamento podem contribuir para a redução do consumo de gás natural, tornando o processo mais sustentável sem comprometer a qualidade do produto final.

Outra alternativa viável para a redução dos impactos ambientais é o reaproveitamento dos refugos do processo na formulação da massa cerâmica. Os resultados mostraram que com essa prática é possível reduzir em até 15% alguns dos principais impactos ambientais do processo, como uso do solo e consumo de água, além da redução também dos demais impactos.

Estudos indicam que essa prática pode ser adotada com sucesso desde que sejam respeitadas as condições adequadas, como um percentual de até 20% do total da massa e a garantia de que o material tenha sido queimado a uma temperatura igual ou superior à da nova queima.

O fato do refugo não exigir etapas intermediárias de processamento é um fator altamente relevante para a redução dos impactos ambientais, pois é uma atividade com pouquíssimos custos e diminui a necessidade de extração e beneficiamento de matérias-primas naturais. No entanto, para ampliar ainda mais os benefícios dessa estratégia, é essencial a realização de novos estudos que avaliem as condições ideais para aumentar o percentual de reaproveitamento sem comprometer as propriedades do produto final.

## 6. REFERÊNCIAS

ANDREOLA, F. BARBIERI, L. LANCELLOTTI, L. LEONELLI, C. MANFREDINI, T. Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies. *Ceramics International* 42, 2016, 13333–13338.

ARAÚJO, M. G. Modelo de Avaliação do Ciclo de Vida para a Gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil. 2013. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ASDRUBALI, Francesco; BALDASSARRI, Catia; FTHENAKIS, Vasilis. Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional italian buildings. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 64, p. 73-89, set. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015). NBR ISO 9001:2015. Sistemas de gestão da qualidade: Requisitos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015). NBR ISO 14040:2015. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015). NBR ISO 14044:2015. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro.

BARSOUM, M. W. *Fundamentals of Ceramics*. CRC Press, 2019.

BERNASCONI, A. BERETTA, M. CURETTI, N. TRIBAUDINO, M. FRANCESCON, F. SARTORI, R. PAVESE, A. Reusing vitreous China fired ceramic scraps in ceramic production: Technological properties and mineralogical insights. *Ceramics International*. 2025.

BORRION, A. L. KHRAISHEH, M. BENYAHIA, F. Environmental life cycle impact assessment of Gas-to-Liquid processes. *Proceedings Of The 3Rd Gas Processing Symposium*, 71-77, 2012.

BOVEA, M. D.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; GALLARDO, A.; COLOMER-MENDOZA, F. J. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management*, v. 30, p. 2383-2395, 2010.

BRAGANÇA, S. R.; ZIMMER, A.; PEDRASSANI, J. Uma revisão sobre a terminologia e classificação das cerâmicas brancas. *Cerâmica*, 65, 485-497. 2019.

CALLISTER, W. *Ciência e Engenharia de materiais: Uma introdução*. 10. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2020.

CARTY, W. M.; SENAPATI, U. Porcelain - Raw Materials, Processing, Phase Evolution, and Mechanical Behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, 81 (1), 3-20. New York, 1998.

CERAME-UNION. Ceramic roadmap to 2050. Disponível em: <https://www.ceramicroadmap2050.eu/>. Acesso em: 09 dez. 2024.

CIACCO, E. ROCHA, J. COUTINHO, A. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. *Applied Thermal Engineering* 113, 1283–1289, 2017.

CONTARTESI, F. Contribuição para a melhoria no desempenho ambiental de porcelanatos: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e o uso de fundentes enérgicos. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

DA CRUZ, R. T.; PEDRASSANI, J.; BRAGANÇA, S. R. Faianças, grês e porcelanas: matérias-primas, moagem, conformação, secagem, queima, esmaltação, decoração, defeitos e propriedades gerais. Porto Alegre, 2022.

DE LAURENTIIS, V. SECCHI, M. BOS, U. HORN, R. LAURENT, A. SERENELLA, S. Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. *Journal of Cleaner Production* 215, (2019), 63-74.

DEL RIO, D. SOVACOOOL, B. FOLEY, A. GRIFFITHS, S. BAZILIAN, M. KIM, J. ROONEY, D. Decarbonizing the ceramics industry: A systematic and critical review of policy options, developments and sociotechnical systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157. 2022.

DI DOMENICO, M. SILVA, T. RIBEIRO, L. Softwares de apoio à Avaliação de Ciclo de Vida. *Gestão e tecnologias para o meio ambiente: visões e ações interdisciplinares. Gestão Ambiental 1*. Caxias do Sul, 2021.

EPPLER, R. OBSTLER, M. *Understanding glazes*. John Wiley & Sons. 2005

EUROPEAN COMMISSION. *Environmental Footprint Methods: Calculating the environmental impact of products and services*. Disponível em: [https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods\\_en](https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en). Acesso em: 08 mar. 2025.

FERRER, S. MEZQUITA, A. AGUILELL, V. M. MONFORT, A. Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles. *Applied Thermal Engineering* 150 (2019) 1002–1015.

FINNVEDEN, G. LINDFORS, L. G. On the nordic guidelines for life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 1996, (1) 45-48.

FORTUNA, D. *Ceramic Technology Sanitaryware*, Faenza Editrice, 2000.

GOLDMAN, M. I. TRACEY JR, J. I. Relations of Bauxite and Kaolin in the Arkansas Bauxite deposits. *Economic Geology*. 41. 567-575. 1946.

HEIN, A. KILIKOGLU, V. Modeling of the microstructure of ancient functional ceramics and assessment of their performance. *Procedia Structural Integrity* 10, 219–226, 2018.

IEA. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions*. Paris, 2007.

INOSTROZA, L.J.V., SÁNCHEZ, J.A.G. Evaluación de la eficiencia térmica del horno túnel de cocción de sanitarios cerámicos de la Planta N° 1 Fanaloza Penco. Universidad del Bío-Bío. Departamento de Ingeniería Mecánica, Chile, 2013.

IPEA. Consumo e Produção Sustentáveis: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. 2019. Disponível em: <https://ipea.gov.br/ods/ods12.html>. Acesso em: 10 dez. 2024.

IPEA. Ação Contra a Mudança Global do Clima: Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos. 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>. Acesso em: 10 dez. 2024.

JACQUEMIN, Leslie; PONTALIER, Pierre-Yves; SABLAYROLLES, Caroline. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [S.L.], v. 17, n. 8, p. 1028-1041, 3 maio 2012. Springer Science and Business Media

KARAMANOV, A. KARAMANOVA, E. FERRARI, A. M. FERRANTE, F. PELINO, M. The effect of fired scrap addition on the sintering behaviour of hard porcelain. *Ceramics International*, 32, 2006, 727–732.

KHASREEN, MM. BANFILL, P. F. G. MENZIES, G. F. Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: a review. *Sustainability* 2009, 1(3), 674-701.

KINGERY, W. D. *Introduction to ceramics*, Wiley – Interscience publication, 1976.

KITOUNI, S.; HARABI, A. Sintering and mechanical properties of porcelains prepared from algerian raw materials. *Cerâmica*, 57, 453-460. Constantine, 2011.

KULAY, L. A. SEO, E. S. M. Orientações conceituais para elaboração de inventários de ciclo de vida. *Interfacehs*, 5(1), 2010.

LIU, M. ZHU, G. TIAN, Y. The historical evolution and research trends of life cycle assessment. *Green Carbon* 2. 425–437. 2024.

LO GIUDICE, A. INGRAO, C. CLASADONTE, M. TRICASE, C. MBOHWA, C. Life cycle assessment for highlighting environmental hotspots in the Sicilian traditional ceramic sector: the case of ornamental ceramic plates. *Journal of Cleaner Production* 142, 225-239, 2017.

LOT, A.V.; NIEVES, L.J.J.; CONTARTESIA, F.; MELCHIADES, F.G.; BOSCHI, A.O. Tintas para Decoração Digital (Jato de Tinta) de Revestimentos Cerâmicos: Parte I - Avaliação Comparativa do Desempenho. *Cerâmica Industrial*, 21 (2), 7-13, 2016.

MEDRI, V. LANDIN, E. Recycling of porcelain stoneware scraps in alkali bonded ceramic composites. *Ceramics International* 40, 307–315, 2014.

MEZQUITA, A. BOIX, J. MONFORT, E. MALLOL, G. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering* 65, 102-110, 2014.

MONFORT, E. MEZQUITA, A. GRANEL, R. VAQUER, E. ESCRIG, A. MIRALLES, A. ZAERA, V. Analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in ceramic tile manufacture. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 49(4), 303-310, 2010.

MONTEIRO, H. CRUZ, P. MOURA, B. Integrated environmental and economic life cycle assessment of improvement strategies for a ceramic industry. *Journal of Cleaner Production* 345. 2022.

MURRAY, H. H. Major kaolin processing developments. *International Journal of Mineral Processing*, 7, 263-274, 1980.

OCAMPO, M. A. A. GONZÁLEZ, A. F. R. Ceramic waste reuse and valorization alternatives: A review. *Revista EIA*, 20(40), 1-19, 2023.

OPENLCA. About openLCA. Disponível em: <https://www.openlca.org/about>. Acesso em: 23 fev. 2025.

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

PRASAD, M. S. REID, K. J. MURRAY, H. H. Kaolin: processing, properties and applications. *Applied Clay Science*, 6, 87-119, 1991.

QUANTIS. About Quantis. Disponível em: <https://quantis.com/who-we-are/discover/about-quantis/>. Acesso em: 09 mar. 2025.

RAMBALDI, E. Pathway towards a High Recycling Content in Traditional Ceramics. *Ceramics*, 4, 486–501, 2021.

REED, J.S. *Principles of Ceramic Processing*, Wiley, NY, 1995.

ROS-DOSDÁ, Teresa; FULLANA-I-PALMER, Pere; MEZQUITA, Ana; MASONI, Paolo; MONFORT, Eliseo. How can the European ceramic tile industry meet the EU's low-carbon targets? A life cycle perspective. *Journal Of Cleaner Production*, 199, p. 554-564, out. 2018.

SILVA, T. H. CASTRO, A. C. VALENTE NETO, M. F. C. SOARES, M. M. N. S. DE RESENDE, D. S. BEZERRA, A. C. S. Recycling ceramic waste as a raw material in sanitary ware production. *Cerâmica*, 65, 2019. 426-431.

SILVESTRI, L. FORCINA, A. SILVESTRI, C. IOPPOLO, G. Life cycle assessment of sanitaryware production: A case study in Italy. *Journal of Cleaner Production* 251. 2020.

STEUBING, B.; DE KONING, D.; HAAS, A.; MUTEL, C. L. The Activity Browser —An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software*

Impacts, 3, p. 100012, 2020.

SUN, Q. YI, A.-L. NI, H.-G. Evaluating scenarios for carbon reduction using different tableware in China. *Science of the Total Environment* 791. 2021.

TARHAN, B. TARHAN, M. AYDIN, T. Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. *Ceramics International*, 43, 2017, 3107–3112.

VIEIRA, A. W. Análise do ciclo de vida de revestimento cerâmico. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2022.

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

VIEIRA, E. A. A (in)sustentabilidade da indústria da mineração no Brasil. *Estação Científica (UNIFAP)*. Macapá, 1(2), p. 01-15, 2011.

WANG, W.; CHEN, J.; SUN, X.; SUN, G.; LIANG, Y.; BI, J. Influence of Additives on Microstructure and Mechanical Properties of Alumina Ceramics. *Materials*, 15, 2956. 2022.

WANG, Y., LIU, Y., CUI, S., SUN, B., GONG, X., GAO, F. Comparative life cycle assessment of different fuel scenarios and milling technologies for ceramic tile production: a case study in China. *J. Clean. Prod.* 273. 2020.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

**Formulação 1**

▼ Impact analysis - Environmental Footprint (Mid-point indicator)

Sub-group by  Flows  Processes | Don't show < 1 %

Name	Category	Impact assessment result
> Land use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	202.31296 Pt
> Resource use, fossils	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	42.67231 MJ
> Water use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	10.23376 m3 depriv.
> Climate change	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	3.39212 kg CO2 eq
> Climate change-Fossil	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	3.38330 kg CO2 eq
> Ecotoxicity, freshwater	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.94451 CTUe
> Ionising radiation, human health	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.18292 kBq U-235 eq
> Eutrophication, terrestrial	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.03091 mol N eq
> Acidification	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.01708 mol H+ eq
> Photochemical ozone formation - humar	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00837 kg NMVOC eq
> Climate change-Biogenic	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00571 kg CO2 eq
> Climate change-Land use and land use cl	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00311 kg CO2 eq
> Eutrophication marine	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00289 kg N eq
> Eutrophication, freshwater	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	3.01890E-5 kg P eq
> Particulate Matter	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	4.58856E-6 disease inc.
> Resource use, minerals and metals	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	5.13382E-7 kg Sb eq
> Human toxicity, non-cancer	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	1.60798E-7 CTUh
> Human toxicity, cancer	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	2.47468E-8 CTUh
> Ozone depletion	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	2.37058E-11 kg CFC11 eq

General information Inventory results **Impact analysis** Normalization and weighti... Process results Contribution tree Grouping Locations Sankey diagram LCIA Checks

**Ceramic tiles, at plant, production mix, per kg active ingredient - EU-28+3**

▼ Impact analysis - Environmental Footprint (Mid-point indicator)

Sub-group by  Flows  Processes | Don't show < 1 %

Name	Category	Impact assessment result
> Resource use, fossils	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	11.58200 MJ
> Land use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	9.20073 Pt
> Ecotoxicity, freshwater	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	1.13461 CTUe
> Climate change	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.77015 kg CO2 eq
> Climate change-Fossil	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.76898 kg CO2 eq
> Water use	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.21832 m3 depriv.
> Ionising radiation, human health	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.07277 kBq U-235 eq
> Eutrophication, terrestrial	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00607 mol N eq
> Acidification	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00406 mol H+ eq
> Photochemical ozone formation - humar	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00158 kg NMVOC eq
> Climate change-Biogenic	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00090 kg CO2 eq
> Eutrophication marine	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00049 kg N eq
> Climate change-Land use and land use cl	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00026 kg CO2 eq
> Eutrophication, freshwater	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	0.00012 kg P eq
> Resource use, minerals and metals	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	4.84263E-5 kg Sb eq
> Particulate Matter	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	2.11572E-6 disease inc.
> Human toxicity, non-cancer	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	2.35038E-7 CTUh
> Human toxicity, cancer	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	3.24763E-8 CTUh
> Ozone depletion	Environmental Footprint (Mid-point indicator)	7.30724E-9 kg CFC11 eq

General information Inventory results **Impact analysis** Normalization and weighti... Process results Contribution tree Grouping Locations Sankey diagram LCIA Checks