



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL - FECIV**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**JOÃO EDISON OLIVEIRA RIBEIRO ASSIS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS DE  
UMA COBERTURA VERDE E OUTRA CONVENCIONAL DE TELHA CERÂMICA**

**Uberlândia**  
**2025**

**JOÃO EDISON OLIVEIRA RIBEIRO ASSIS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS DE  
UMA COBERTURA VERDE E OUTRA CONVENCIONAL DE TELHA CERÂMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Uberlândia como requisito parcial  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>a</sup> Livia Borba Agostinho

**Uberlândia  
2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e finalização dessa jornada. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora Livia e à professora Eliane, cuja disposição, orientação e apoio foram fundamentais em todas as etapas deste projeto. Sua disposição, paciência e dedicação foram inspiradoras e me guiaram durante todo o processo.

Também desejo estender meus agradecimentos aos meus colegas de classe e amigos que compartilharam momentos e apoio ao longo do caminho. Suas contribuições foram inestimáveis e tornaram esta jornada mais tranquila, significativa e enriquecedora.

Além disso, gostaria de expressar minha gratidão aos membros da banca avaliadora, por dedicarem seu tempo e expertise na análise e avaliação deste trabalho. Suas sugestões e críticas construtivas são essenciais para aprimorar o conteúdo e a qualidade deste estudo.

Não poderia deixar de agradecer também à minha família, em especial minha mãe Sílvia, pelo constante incentivo, amor e apoio incondicional ao longo de toda a minha jornada até aqui. Seu apoio foi o alicerce que me permitiu alcançar meus objetivos e superar desafios.

Por fim, à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Civil da UFU por todo o conhecimento adquirido e pela oportunidade de crescimento ao longo desses anos.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento por fazerem parte deste importante capítulo da minha vida acadêmica. Suas contribuições foram inestimáveis e jamais serão esquecidas.

Muito obrigado.

## RESUMO

A crescente preocupação global com as emissões de gases do efeito estufa e o consumo de energia tem gerado discussões em diversos setores. Na construção civil, o telhado verde emerge como uma alternativa promissora para mitigar os efeitos das ilhas de calor e enchentes, além de melhorar o isolamento térmico e acústico. Apesar de suas vantagens, sua adoção é limitada devido a fatores como falta de conhecimento, escassez de mão de obra qualificada, custos de instalação e manutenção, e falta de incentivos. Nesse cenário, a análise do ciclo de vida (ACV) surge como uma ferramenta crucial para avaliar os impactos ambientais dos telhados verdes e compará-los com alternativas convencionais. Estudos existentes destacam a importância de considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também a viabilidade econômica e as percepções públicas. Este estudo tem como objetivo analisar a aplicação da Análise do Ciclo de Vida (ACV) em telhados verdes e telhados convencionais compostos por telhas cerâmicas, realizando uma comparação dos impactos ambientais associados a cada tipo. A partir da comparação dos resultados obtidos, busca-se compreender de que forma a ACV pode ser efetivamente aplicada no contexto da construção civil, bem como suas implicações no processo de tomada de decisão voltado à adoção de soluções sustentáveis para coberturas. Os resultados indicam que, embora os telhados verdes apresentem, em sua maioria, desempenho ambiental superior, a aplicação da ACV demanda uma abordagem criteriosa e rigorosa, sendo necessário considerar e aprimorar diversos aspectos metodológicos a fim de garantir maior precisão e confiabilidade nas conclusões obtidas.

**Palavras-chave:** *telhado verde; telhado convencional; telhado cerâmico; avaliação de ciclo de vida.*

## ABSTRACT

The growing global concern regarding greenhouse gas emissions and energy consumption has sparked discussions across various sectors. In the construction industry, green roofs have emerged as a promising alternative to mitigate the effects of urban heat islands and flooding, while also enhancing thermal and acoustic insulation. Despite their advantages, the adoption of green roofs remains limited due to factors such as lack of awareness, shortage of skilled labor, high installation and maintenance costs, and insufficient incentives. In this context, Life Cycle Assessment (LCA) serves as a crucial tool for evaluating the environmental impacts of green roofs and comparing them to conventional alternatives. This study aims to analyze the application of Life Cycle Assessment (LCA) to green roofs and conventional ceramic tile roofs, conducting a comparative assessment of the environmental impacts associated with each type. By comparing the results obtained, the study seeks to understand how LCA can be effectively applied within the construction sector, as well as its implications for decision-making processes aimed at adopting sustainable roofing solutions. The findings indicate that, although green roofs generally demonstrate superior environmental performance, the application of LCA requires a thorough and rigorous approach. It is essential to consider and refine various methodological aspects in order to ensure greater accuracy and reliability in the conclusions drawn.

**Keywords:** *green roof; conventional roof; ceramic roof; life cycle assessment.*

## SUMÁRIO

|            |                                                                                |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>  | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>2.</b>  | <b>COBERTURA VERDE .....</b>                                                   | <b>9</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Isolamento térmico, Economia de energia e Gestão de águas pluviais.....</b> | <b>11</b> |
| <b>3.</b>  | <b>ANÁLISE DE CICLO DE VIDA.....</b>                                           | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Categorias de análise.....</b>                                              | <b>14</b> |
| <b>4.</b>  | <b>METODOLOGIA .....</b>                                                       | <b>17</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Definição do Sistema .....</b>                                              | <b>18</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Unidade Funcional .....</b>                                                 | <b>18</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Fronteiras e Fases do Sistema .....</b>                                     | <b>18</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Inventário .....</b>                                                        | <b>19</b> |
| 4.4.1      | Telhado Convencional.....                                                      | 19        |
| 4.4.2      | Telhado Verde .....                                                            | 21        |
| 4.4.3      | Energia gasta no período de uso.....                                           | 22        |
| <b>4.5</b> | <b>Aplicação dos dados no <i>Software</i> .....</b>                            | <b>22</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Avaliação dos impactos e interpretação .....</b>                            | <b>25</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS FINAL .....</b>                               | <b>27</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Etapa de Produção .....</b>                                                 | <b>27</b> |
| 5.4.3      | Influência dos materiais.....                                                  | 27        |
| 5.1.2      | Categorias de impacto .....                                                    | 28        |
| <b>5.5</b> | <b>Etapa de uso .....</b>                                                      | <b>29</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Etapa de Descarte.....</b>                                                  | <b>30</b> |
| 5.3.1      | Descarte total.....                                                            | 30        |
| 5.3.2      | Reciclagem .....                                                               | 31        |
| <b>6.</b>  | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                         | <b>33</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                       | <b>35</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com a emissão de gases do efeito estufa e o consumo de energia torna-se crescente, sendo pauta de discussões em diferentes setores. No âmbito da construção civil, alternativas para atenuar os efeitos do aquecimento global, como as ilhas de calor e enchentes, têm sido discutidas com mais frequência a cada ano.

Dentre essas alternativas, o telhado verde vem apresentando-se como uma interessante opção no combate aos efeitos de ilhas de calor em grandes cidades e na melhoria do isolamento térmico, visto que sua aplicação impede a propagação e retenção de calor, pois essa estrutura de telhado é composta por uma camada de vegetação e solo, o que faz com que o calor seja retido e dissipado, melhorando assim, consideravelmente, o microclima da edificação.

Além da enorme importância quanto ao isolamento térmico, o telhado verde também colabora com o isolamento acústico, a melhora da qualidade do ar, a redução do estresse urbano e com uma maior retenção das águas pluviais, contribuindo com escoamento das mesmas (CASTLETON *et al.*, 2010; LAMBERTS *et al.*, 2010).

Apesar dessas vantagens, o telhado verde ainda é uma técnica pouco utilizada, no Brasil, possivelmente por ser mais comum em localidades com o clima mais frio. Com isso, existem poucas normas acerca desse estilo de cobertura, o que gera desconhecimento dos usuários, escassez de mão de obra qualificada para sua aplicação, custo de instalação e manutenção ou até mesmo falta de incentivos gerais.

De acordo com Delbono e Rodrigues (2014), incentivos para a utilização de materiais sustentáveis na construção civil podem ser adotados pelo governo por meio de legislações. Em Recife, por exemplo, a lei 18.112/2015 prevê que “projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais, com mais de 400 m<sup>2</sup> de área de cobertura, deverão prever a implantação de ‘Telhado Verde’ para sua aprovação”.

Em Chicago, após uma intensa onda de calor em 1995 que vitimou muitas vidas em poucos dias, houve também uma difusão no uso de telhados verdes, tornando-se uma das cidades com maior área de coberturas verdes dos Estados Unidos (BONI, 2015). Fato esse que contribuiu com a disseminação da técnica, colaborando com a redução do custo de implantação nessa região.

A análise do ciclo de vida (ACV) pode minimizar as dificuldades na adoção de técnicas e/ou sistemas construtivos sustentáveis. Trata-se de uma metodologia que permite medir os possíveis impactos ambientais de um produto ou sistema construtivo ao longo do seu ciclo de uso e aplicação, desde a extração do material até a disposição final.

Por apresentar um método objetivo e quantitativo, a metodologia da ACV pode entregar comparações entre produtos de mesma função, o que permite a identificação de pontos críticos de cada configuração analisada e ainda, oferece a melhor escolha dos materiais menos prejudiciais ao meio ambiente, bem como possíveis melhorias nos processos de produção.

Levando em conta a Avaliação do Ciclo de Vida de telhados verdes, importantes estudos se concentram em avaliar o desempenho ambiental dessas coberturas em comparação com telhados convencionais ou outros tipos de telhados (Saiz et al., 2006; Koura et al., 2020; Bachawati et al., 2016). Em certos casos, essa comparação é feita entre os diferentes materiais presentes nas camadas da estrutura (Chernani et al., 2015; Pushkar, 2019).

Tendo em vista que o uso de telhados verdes cresce e se desenvolve a cada dia, é necessário analisar os impactos ambientais associados a esses telhados. Ao aplicar-se a ACV, a viabilidade econômica e as percepções públicas e ambientais tornam-se tópicos de análise de melhoria, especialmente no desenvolvimento de produtos e decisões de investimento que amenizam os impactos desses produtos e técnicas ao meio ambiente.

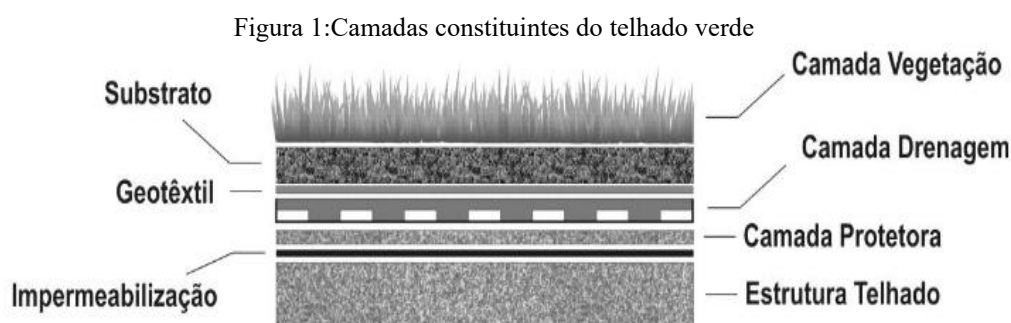
Tal método de avaliação é utilizado com frequência na indústria, que busca aumentar a eficiência das produções, reduzir o custo e ainda garantir uma imagem sustentável para o público. Da mesma forma, o governo utiliza esse recurso para elaborar políticas públicas que incentivam práticas cada vez mais voltadas ao meio ambiente principalmente no ramo da construção civil.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é estudar o método de aplicação de uma ACV, analisando uma pesquisa já existente voltadas ao mesmo tema, porém com o foco em uma determinada categoria de análise. Neste trabalho, o foco será a aplicação da mesma metodologia, aproveitando os modelos de telhado cerâmico convencional e verde, porém utilizando a ACV de maneira mais ampla observando resultados de todas as categorias resultantes do método de análise.

Ao fim, será possível ter-se uma noção de como aplicar de maneira concreta uma análise de ciclo de vida e, conseqüentemente, fazer as devidas comparações usando tal ferramenta.

## 2. COBERTURA VERDE

O telhado verde é uma estrutura de cobertura vegetal, executada na posição horizontal (em lajes de concreto) ou inclinada (estrutura convencional) que faz uso de plantas adaptadas à região com uma configuração basicamente caracterizada como uma substituição do telhado convencional por uma cobertura vegetal. De acordo com Tassi *et al.* (2014), o telhado verde é composto por diferentes camadas, como apresentado na Figura 1.



Fonte: Tassi et al. (2014).

**(a) Camada de vegetação:** essa camada geralmente é composta por plantas de baixo porte, como gramíneas e arbustos, cujo crescimento se adapta a substratos pouco profundos. Essa cobertura verde precisa apresentar certa compatibilidade com as condições climáticas da região em que será instalada, para isso é preciso a aplicação de uma vegetação local que possua características compatíveis, permitindo assim sua sobrevivência no local de instalação. Essa vegetação atua interceptando uma fração da água das precipitações, evitando seu contato com o solo e, pelo processo de evapotranspiração, transferir parte da água captada para a atmosfera, o que aumenta a eficiência de retenção da camada. Em complemento, a vegetação ainda atrasa o escoamento superficial, que passa a acontecer apenas quando a camada do substrato atinge a saturação, o que diminui significativamente o volume de água, escoando pelas vias dos centros urbanos. Esta camada interage diretamente com o substrato, absorvendo nutrientes e água, e exerce influência indireta sobre todas as camadas inferiores, em razão do peso da vegetação, da retenção de umidade e do desenvolvimento do sistema radicular.

**(b) Substrato:** é formado por uma camada de solo com o intuito de suportar e dar fixação para a camada vegetal e, ainda, fornecer água e nutrientes essenciais para a conservação da mesma. O substrato é tão importante quanto a camada de vegetação para o armazenamento da água durante as chuvas, visto que geralmente possui uma elevada capacidade de absorção.

**(c) Filtrante:** camada que servirá como uma espécie de filtro, geralmente constituído por uma manta geotêxtil, que separa a camada vegetal e o substrato da camada de dreno. Ela ajuda a prevenir a passagem de partículas do substrato para o interior da camada drenante.

**(d) Camada de drenagem:** camada composta de brita, manta geotêxtil ou agregados graúdos como cacos de telhas e restos de cerâmica. Atua evitando alagamentos indesejáveis e o estresse hídrico da vegetação ao escoar o excesso de água. Além disso, pode atuar no armazenamento de água para a vegetação nos períodos de estiagem.

**(e) Camada protetora:** tem função de reter a umidade e os nutrientes acima da estrutura do telhado. Fornece, assim, proteção para a membrana impermeabilizante contra o desenvolvimento de raízes da vegetação.

**(f) Impermeabilização:** aplicada com o uso de hidrorrepelentes, como as mantas asfálticas ou soluções asfálticas anti raiz, no intuito de evitar o contato entre a água e a estrutura do telhado.

**(g) Estrutura do telhado:** sistema apropriado com o intuito de suportar toda a carga do telhado verde.

A estrutura componente do telhado verde pode ser caracterizada por duas tipologias principais: intensivo e extensivo. A estrutura denominada intensiva, apresenta uma espessura significativa de 15 cm a 90 cm, o que possibilita a implantação de plantas de maiores portes, como arbustos e até mesmo árvores (HENEINE, 2008). Por tal característica, o telhado verde intensivo apresenta um peso maior em comparação ao extensivo e, conseqüentemente, necessita de maior desempenho da estrutura de sustentação. Com a aplicação da vegetação local, existem casos em que a cobertura verde intensiva serve até mesmo para espaços recreativos e de lazer, dependendo do investimento aplicado. Apresenta uma camada drenante bem espessa em comparação ao sistema extensivo e muitas vezes utiliza-se a irrigação para a vegetação quando aplicada na cobertura.

Os telhados verdes chamados extensivos, por sua vez, têm suas camadas mais delgadas (5 cm a 15 cm) e com menor peso em comparação ao intensivo (HENEINE, 2008). Sua vegetação é representada por plantas de pequeno porte e geralmente resistentes a circunstâncias climáticas adversas. Por apresentarem-se em menor volume, é conseqüentemente uma alternativa mais barata, pois necessitam de quantidades menores de materiais para sua concepção e estruturas mais simples para a sua sustentação. Além disso, carecem de pouco, ou quase nenhum, sistema de irrigação, visto que em grande parte dos períodos, a água armazenada e retida serve para sustentar a necessidade hídrica da própria cobertura vegetal.

## **2.1 Isolamento térmico, Economia de energia e Gestão de águas pluviais**

Segundo Silva e Bormio (2016) o ambiente influencia muito nas atividades e desempenho do indivíduo, uma vez que interfere diretamente na produtividade, comportamento e saúde do sujeito tanto de maneira positiva quanto negativa. Dessa forma, busca-se um ambiente confortável que garanta o bem-estar e a segurança do usuário e que proporcione a esse uma experiência tranquila, agradável e que satisfaça as suas necessidades.

A aplicação do telhado verde, traz benefícios não só para os usuários, mas também para o microclima da sua localidade justamente por apresentar uma vegetação que, por sua vez, tem a função de oferecer certa estabilidade para o clima local.

Essa melhoria no ambiente traz benefícios para a saúde dos indivíduos, justamente por manter-se o contato com a natureza principalmente em um meio muito urbanizado, o qual traz consigo o contato frequente com a poluição atmosférica, grande causadora de problemas respiratórios e até mesmo doenças cardíacas (SANTAMOURIS et al, 2007).

Existem ainda estudos sobre a cobertura verde com foco no isolamento térmico que, além de trazer como benefícios o conforto e a prevenção de doenças cardiorrespiratórias com a redução das ilhas de calor, provam que a aplicação do telhado verde também traz consigo a redução no consumo e no custo de energia (SANTAMOURIS et al, 2007). Essas melhorias trazidas com a aplicação da cobertura verde dão-se por meio do incremento do isolamento térmico e acústico, oferecidos pelas camadas de solo e vegetação que amenizam a transmissão de calor e ruído para o interior da edificação, o que garante certa economia de energia.

Outro ponto importante, comentado simultaneamente à cobertura verde em pautas governamentais, é o sequestro de carbono. Neste caso, a cobertura vegetal absorve gás carbônico, filtra o ar atmosférico e produz oxigênio, tem-se aí um grande potencial quando o assunto é sustentabilidade. Do mesmo modo, a cobertura verde também serve de habitat para pequenos insetos, como borboletas e outros vertebrados, intensificando a biodiversidade da região (MINKE, 2004.)

Com o crescimento urbano, maior são as áreas impermeáveis, o que reduz a possibilidade de infiltração da água das chuvas de formas naturais. A aplicação do telhado verde nessas áreas, apresenta grande importância para o escoamento superficial, visto que tanto a vegetação quanto o solo interceptam o escoamento das águas pluviais, com o seu armazenamento no solo e com o uso dessa água no processo de evapotranspiração, contribuindo para a redução de enchentes nos grandes centros urbanizados (PINTO, 2007).

### 3. ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma das ferramentas de análise auxiliar na escolha entre materiais sob uma perspectiva sustentável. A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e disposição (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Todas as etapas do ciclo de vida dos componentes, desde a extração da matéria prima, passando pelo seu transporte e utilização até chegar ao seu descarte, são utilizados e estudados, o que possibilita que a avaliação seja a mais completa possível. Além de proporcionar um maior mapeamento em possíveis alterações nas diferentes fases, em busca de avanços para o próprio perfil ambiental.

A ACV se expressa basicamente nas comparações dos impactos ambientais e nas análises dos componentes que apresentam as mesmas funções no conjunto estudado. Dessa forma, ela traduz o fluxo de energia e matéria, o que permite a comparação das informações obtidas (Figura 2).

Figura 2 - Representação simplificada da ACV de produção de um material



Fonte: Autor

No Brasil, a Avaliação do Ciclo de Vida é feita por meio do conjunto de normas da série ISO 14000. Sendo a NBR ISO 14040, que regulamenta a estrutura e os princípios gerais; A NBR ISO 14041, que trata da definição dos objetivos; escopo e análise dos inventários; A NBR ISO 14042, que aborda a avaliação dos impactos ambientais; E, por fim, a NBR ISO 14043, que foca na interpretação do ciclo de vida.

A aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida percorre cinco etapas, das quais cada uma colabora essencialmente para o desenvolvimento da análise, sendo assim, cada uma indispensável no processo (Figura 3).

A primeira etapa, traduz-se basicamente na **definição do sistema** de estudo, das fronteiras e da unidade funcional estudada. O objetivo do estudo deve explicitar as possíveis aplicações dos resultados e o propósito da análise aplicada, por isso precisa ser apresentado de forma concisa e nítida. Dessa forma, a definição do objetivo ajuda na identificação das referências importantes para as próximas etapas.

As fronteiras do sistema classificam quais os estágios do ciclo a análise atuarão, seja desde a obtenção da matéria prima (berço), passando pela produção e utilização do item estudado, até chegar ao seu descarte ou fim de utilização (túmulo). Dependendo do tipo de estudo, é possível que sejam analisadas todas as etapas ou até mesmo etapas separadas.

A **unidade funcional** é a representação do produto cuja função será observada, podendo ser retratado, no caso de uma análise na construção civil, como um edifício inteiro ou apenas uma fração desse todo. Ainda, ao se escolher a unidade funcional, faz-se necessário a definição de um intervalo de tempo no qual as unidades serão observadas (por exemplo, 1 m<sup>2</sup> de um telhado cerâmico convencional *versus* 1 m<sup>2</sup> de cobertura verde).

Essa escolha da unidade funcional deve ser muito bem estabelecida dentro do objetivo de análise, visto que seu impacto sobre os resultados da ACV é muito grande.

O **inventário de massa-energia** vem como a próxima etapa e precisa ser previamente determinado, após a escolha da unidade funcional, para garantir que o fluxo de entrada dos materiais alcance a saída como unidade funcional e descarte. É uma etapa essencial para a avaliação de impactos ambientais.

Esses inventários proporcionam o encontro de problemas e revelam possíveis demandas de informação, o que possibilita revisões e melhorias nas coletas de dados e nas diretrizes do estudo

A **avaliação dos impactos ambientais** é a terceira etapa e foca em integrar os fatores de impacto em categorias, como impactos locais, regionais e globais, dependendo de suas magnitudes, para que depois possam ser foco de um estudo comparativo.

O penúltimo passo é a **definição de uma base de comparação**, que consiste nos parâmetros anteriores citados, junto de um modelo para agregá-los a um procedimento que permita a reflexão e a conclusão das comparações. Dessa maneira, os resultados são transformados e, de acordo com cada importância e transformação, são associados em seus respectivos indicadores de ACV.

Por fim, nos **estudos de incerteza de dados**, analisa-se as influências das mudanças nos dados de entrada e, caso tais mudanças alterem o resultado final, a metodologia será considerada fraca.

Figura 3 – Método de aplicação da ACV.



Fonte: Autor

### 3.1 Categorias de análise

Ao selecionar o tipo de *software* a ser utilizado para a aplicação de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV), é igualmente necessário definir qual método de avaliação será adotado.

Um dos métodos de específicas fácil acesso e disponibilidade é o *ReCiPe 2016*, que disponibiliza indicadores tanto de ponto médio (*midpoint*) quanto de ponto final (*endpoint*) oferecendo uma abordagem em dois níveis que permite aos usuários optarem entre uma análise mais detalhada, com foco em categorias de impacto (pontos médios), ou uma visão mais agregada e abrangente dos impactos ambientais (pontos finais) sendo esta última a utilizada neste trabalho. Essa metodologia é voltada a profissionais, de pesquisadores, formuladores de políticas públicas, representantes da indústria e consultores que demandam uma ferramenta robusta, flexível e confiável para a avaliação de impactos ambientais.

Dessa forma, tentou-se entender como cada uma das categorias poderia impactar o meio ambiente ao se aplicar a situação analisada.

A primeira categoria observada foi o **aquecimento global** que nada mais é do que o aumento da temperatura média da Terra, provocado principalmente pela emissão de gases de efeito estufa resultantes das atividades. A unidade utilizada para os dados de saída relacionados ao aquecimento global foi expressa como “kg CO<sub>2</sub> eq” (quilogramas de equivalente de dióxido de carbono) pelo *SimaPro*.

Outra categoria de efeito analisada é a **depleção da camada de ozônio**, que se refere ao impacto adverso dos clorofluorcarbonos (CFCs) na redução da concentração de ozônio na estratosfera, essencial para a proteção da Terra contra a radiação ultravioleta. Para quantificar esse impacto, o método *ReCiPe* utiliza a leitura dos dados de saída como quilogramas de CFC-11 equivalente por quilograma de emissão.

**Radiação ionizante** é uma forma de radiação com energia suficiente para ionizar átomos, podendo ocorrer por partículas subatômicas ou radiação eletromagnética. Essa radiação pode causar danos a células biológicas, resultando em mutações genéticas e aumento do risco de câncer. A medida utilizada para quantificar esse impacto, pelo *software*, é o “kBq Co-60 eq” que se refere à atividade radioativa expressa em quilobecquerel (kBq), uma unidade que representa a atividade equivalente de radiação em termos de desintegrações por segundo que seriam produzidas por uma amostra de cobalto-60.

A **formação de ozônio** na troposfera, proveniente da reação de poluentes como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, gera impactos negativos ao meio ambiente. Este ozônio compromete a qualidade do ar, causando problemas respiratórios em humanos (**saúde humana**), e danifica a vegetação, reduzindo a fotossíntese (**ecossistemas terrestres**). O parâmetro “kg NO<sub>x</sub> eq”, utilizado para esta categoria de impacto, é utilizado para avaliar o impacto ambiental total de atividades ou produtos em relação às emissões de óxidos de nitrogênio.

A deposição de poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre e nitrogênio pode causar a **acidificação terrestre**, que é exatamente o aumento da acidez do solo. Esse processo prejudica a saúde do solo, a biodiversidade e a produtividade agrícola, além de afetar a qualidade da água e liberar metais pesados. A medida utilizada para expressar a acidificação terrestre é “kg SO<sub>2</sub> eq” (quilograma de equivalente de dióxido de enxofre). Essa unidade representa a quantidade de um poluente que causaria um efeito ambiental equivalente ao de 1 kg de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

A **eutrofização** é mais um impacto bem conhecido, e trata-se basicamente do enriquecimento excessivo de nutrientes em corpos d'água (tanto marinha quanto água doce) principalmente nitrogênio e fósforo, levando ao crescimento descontrolado de algas. Isso resulta na diminuição da oxigenação, prejudicando a vida aquática e a qualidade da água. A medida utilizada para quantificar a eutrofização marinha é “kg N eq” que significa a quantidade de nitrogênio equivalente presente na água. Já a grandeza para a eutrofização de água potável é “kg P eq” que se refere a “quilogramas de fósforo equivalente”.

A **ecotoxicidade** refere-se ao potencial de substâncias químicas ou contaminantes de causar efeitos adversos em organismos vivos e em ecossistemas. Esse conceito abrange a toxicidade para diferentes níveis de organismos, desde microrganismos até plantas e animais. A toxicidade é definida no método *ReCiPe* pela medida "kg 1,4-DCB" que se refere como "quilogramas de 1,4-diclorobenzeno", um composto químico que pertence à família dos benzenos clorados. Essa medida, em quilogramas, indica a quantidade desse composto, geralmente em contextos de monitoramento ambiental ou avaliação de riscos em relação à toxidade.

A medida em "kg Cu eq" permite expressar a quantidade **escassez de recursos minerais** em termos de equivalentes de cobre, considerando fatores como a toxicidade, a escassez e a demanda por cada metal. Isso ajuda a avaliar o impacto ambiental e a sustentabilidade da extração e do uso de diferentes minerais, proporcionando uma forma padronizada de análise.

A **escassez de recursos fósseis** é frequentemente representada por "kg oil eq" (quilogramas de equivalente a petróleo) para facilitar a padronização da medida de energia, permitindo que diferentes combustíveis sejam comparados em termos de seu potencial energético.

Por fim, o **uso da terra** e o **consumo de água** são, respectivamente, representados por  $m^2$  e  $m^3$  e significam exatamente o consumo literais desses recursos.

#### 4. METODOLOGIA

Esta pesquisa tem como objetivo comparar os impactos ambientais de um telhado convencional de telhas cerâmicas e uma cobertura verde, ambos usando o aplicativo gratuito *SimaPro* para a análise de ciclo de vida. Sendo assim um estudo de caso com aplicação de métodos.

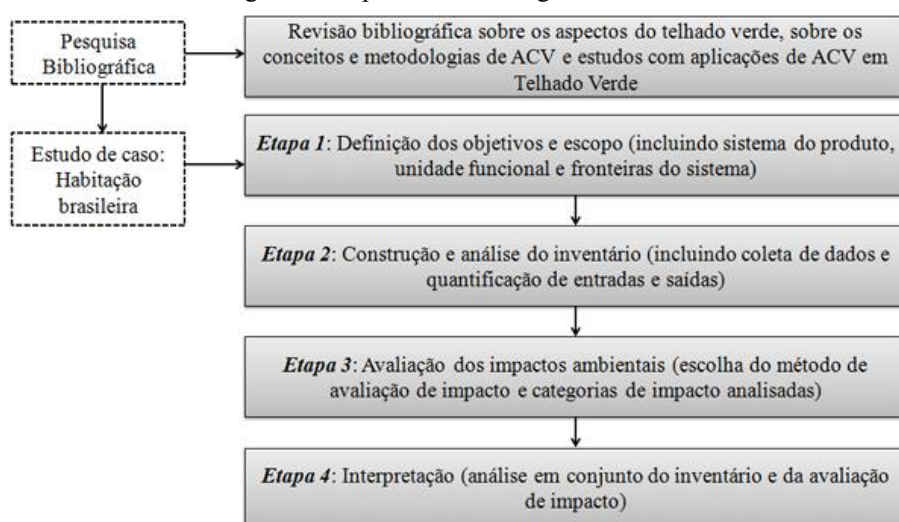
Devido à complexidade e ao elevado nível de detalhamento exigidos em uma análise de ciclo de vida, optou-se por utilizar como referência a dissertação de mestrado de Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira, intitulada "*Depleção Abiótica e Potencial de Aquecimento Global no Ciclo de Vida de Telhado Verde Comparativamente a um Telhado Convencional*".

A partir dessa dissertação, foram aproveitadas informações relevantes acerca da estrutura do telhado, como o próprio modelo utilizado, além de serem aproveitadas etapas do estudo que demandariam um tempo significativo e um grau elevado de minúcia para serem abordadas de forma independente. Essa abordagem permitiu otimizar o processo de pesquisa, garantindo a inclusão de dados substanciais e pertinentes à análise.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é demonstrar a aplicação dos processos envolvidos na execução de uma análise de ciclo de vida de maneira geral, observando todas as categorias disponíveis no método de análise de modo geral. Essa abordagem permite uma visão abrangente e facilita a compreensão dos métodos básicos aplicáveis na análise de ciclo de vida.

Com tais considerações os primeiros passos para a análise foram seguidos conforme o trabalho de referência.

Figura 4: Etapas da metodologia utilizadas no estudo.



Fonte: Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira (2017)

A etapa inicial deste trabalho foi dedicada ao estudo preliminar da dissertação, assim como à análise de outros textos e materiais pertinentes, com o objetivo de aprofundar a compreensão da Análise de Ciclo de Vida.

Para a realização da análise e aplicação neste trabalho, optou-se pelo método *ReCiPe* de 2016, utilizando o *software SimaPro* como ferramenta de apoio. A escolha desse *software* deu-se devido a facilidade de compreensão e interface intuitiva. A versão empregada foi uma versão de demonstração gratuita, o que, embora tenha imposto algumas limitações, permitiu realizar ajustes necessários para adequar a análise aos requisitos do estudo.

Dessa forma, tornou-se viável compreender cada impacto e a maneira como cada categoria se traduz na análise prática.

Na análise aplicada, as 18 categorias do método *ReCiPe 2016* foram examinadas de acordo com o próprio relatório do método, denominado “RIVM Report 2016-0104”. O motivo para a escolha desse método foi a limitação da versão demo do programa utilizado e pela maior variação de impactos abrangida pelo mesmo.

#### **4.1 Definição do Sistema**

O caso estudado teve como foco a comparação entre dois sistemas de cobertura: telhado verde e telhado convencional. Para tal, foi selecionado um modelo de habitação localizada em Brasília, com área aproximada de 50 m<sup>2</sup> e vida útil estimada em 50 anos, conforme a norma ABNT NBR 15575:2013.

#### **4.2 Unidade Funcional**

A unidade funcional utilizada na análise foi de 1 m<sup>2</sup> de cobertura, sendo essa comum a ambos os sistemas analisados, com espessura variável conforme o tipo de cobertura. Assim, todos os resultados das categorias de impacto foram apresentados em valores correspondentes a essa unidade funcional.

#### **4.3 Fronteiras e Fases do Sistema**

Na Análise de Ciclo de Vida aplicada, nem todas as etapas de um sistema construtivo foram consideradas. Contudo, foram avaliadas as fases de construção (produção), uso e fim de vida, sendo esta última subdividida em duas possibilidades: descarte total e reciclagem.

O transporte foi excluído desta análise para simplificar o estudo, uma vez que o foco principal recaiu sobre os materiais utilizados nos processos construtivos e seu comportamento durante a fase de uso. Para a realização da ACV da porta ao túmulo, foi necessário estabelecer limitações nas fronteiras do escopo, com o objetivo de facilitar a análise. Essas limitações resultaram nas seguintes fronteiras:

**Fronteira temporal:** Baseada nos dados do *software SimaPro Demo* de 2024 e na versão do método *ReCiPe 2016 v1.1* de 2018;

**Fronteira geográfica:** O estudo utilizou dados internacionais (universais) do *software SimaPro*, priorizando a seleção de materiais compatíveis com as configurações do Brasil sempre que disponíveis;

**Fronteira tecnológica:** A fronteira tecnológica diz respeito ao sistema construtivo convencional com concreto usinado.

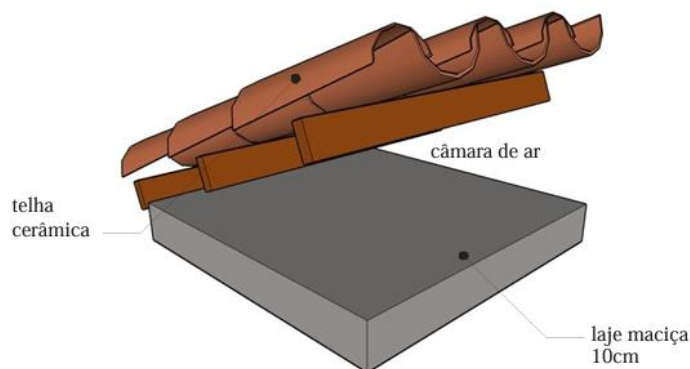
## 4.4 Inventário

### 4.4.1 Telhado Convencional

Para a montagem inicial do telhado convencional de telha cerâmica foram utilizados uma laje de concreto armado, com espessura de 10 cm, e estrutura em armação de pontaletes e trama de terças, caibros e ripas de madeira com sombreamento com telha cerâmica tipo Plan, conforme Figura 5.

Para a laje construída foi adotado um concreto usinado com  $F_{ck}$  de 30MPa e única energia aplicada para o processo foi o para o adensamento do concreto, embora a energia utilizada na produção deste mesmo concreto devesse ser considerada, por ser um gasto significativo.

Figura 5: Modelo telhado convencional



Para a implementação do inventário no *software SimaPro*, foi necessário identificar as representações dos materiais ou modelos equivalentes dentro do sistema. Os materiais equivalentes utilizados na aplicação da análise no *software* estão indicados na Figura 6.

Figura 6: Inventário de entrada telhado convencional.

| Material Referência              | Material equivalente SimaPro                                               |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Cimento (CEMI 32.5)              | Cimento, não especificado {BR}   cimento, não especificado                 |
| Elettricidade                    | Elettricidade, alta tensão {RDM}   produção de eletricidade, hidroelétrica |
| Seixo                            | Cascalho {RDM}   mercado de cascalho                                       |
| Areia                            | Areia {RDM}   mercado de areia                                             |
| Telha Cerâmica                   | Telha cerâmica {RDM}   produção de telha cerâmica                          |
| Madeira (estrutura da cobertura) | Madeira estrutural {RDM}   mercado de madeira estrutural                   |
| Aço                              | Aço para armadura {RDM}   produção de aço para armadura                    |

Fonte: Autor.

O quantitativo e as perdas do concreto, estrutura de madeira e telhas cerâmicas, foram computados e seus valores totais estão representados na Tabela 1.

Foram estes valores os utilizados para o cálculo de todas as etapas analisadas no *SimaPro*. Inicialmente aplicado para a etapa de produção do sistema e, depois, reutilizado automaticamente para as etapas seguintes pelo próprio *software*.

Tabela 1: Dados de entrada para ACV do telhado convencional

| Fluxo          | Quantidade | Unidade |
|----------------|------------|---------|
| Cimento        | 41,2       | Kg      |
| Elettricidade  | 2,7        | MJ      |
| Seixo          | 120        | Kg      |
| Areia          | 111        | Kg      |
| Telha Cerâmica | 86,2       | Kg      |
| Madeira        | 35,9       | Kg      |
| Aço            | 3,5        | Kg      |

Fonte: Autor

#### 4.4.2 Telhado Verde

O sistema de telhado verde utilizado para esta análise é do tipo modular, por conta da facilidade de construção e manutenção. O substrato e a vegetação são alocados nos módulos bem como a água drenada que, quando não utilizada pelas plantas do sistema, é captada por um sistema coletor.

O sistema estrutural foi aplicado utilizando-se vigas de madeira Angelim Pedra (7x15cm) com fechamento em compensado estrutural do tipo OSB (Oriented Strand Board), dessa forma dispensou-se forro, já que as vigas se apoiariam diretamente em uma cinta de concreto sobre a vedação vertical. Os componentes equivalentes para a montagem do sistema de telhado verde no *SimaPro* estão indicados na Figura 7.

Figura 7: Inventário de entrada telhado verde

| Material Referência           | Material equivalente SimaPro                                                                      |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Seixo                         | Cascalho, rolado {RDM}   mercado de cascalho, rolado                                              |
| OSB (Oriented Strand Board)   | Chapas de partículas, para uso externo {RDM}   produção de chapas de partículas, para uso externo |
| Poliéster Poliul [Plastics]   | Poliuretano, espuma flexível {RER}   mercado de poliuretano, espuma flexível                      |
| Poliétileno de alta densidade | Poliétileno, alta densidade, grânulos {RDM}   produção de poliétileno, alta densidade, grânulos   |
| Areia                         | Areia {RDM}   mercado de areia                                                                    |
| Madeira sólida (softwood)     | Madeira estrutural {RER}   mercado de madeira estrutural                                          |
| Composto orgânico             | Composto {RDM}   tratamento de resíduos orgânicos de jardim, compostagem caseira em pilhas        |

Fonte: Autor

Para facilitar a drenagem, foi considerada uma membrana geotêxtil abaixo do substrato e, para diminuir a necessidade de irrigação, foram utilizadas suculentas como vegetação, porém, para o efeito de impacto ambiental, o tipo de vegetação foi desconsiderado.

Da mesma forma que para o telhado convencional os quantitativos para o sistema de telhado verde foram calculados e considerados, com as devidas adaptações ao *software*, como mostrado na Tabela 2

Tabela 2: Dados de entrada para ACV do telhado verde

| Fluxo                         | Quantidade | Unidade |
|-------------------------------|------------|---------|
| Seixo                         | 27,4       | Kg      |
| OSB                           | 0,0203     | m³      |
| Poliéster Poliul              | 0,18       | Kg      |
| Poliétileno de alta densidade | 0,09       | Kg      |
| Areia                         | 0,48       | Kg      |
| Madeira                       | 0,0212     | m³      |
| Composto                      | 32,1       | Kg      |

Fonte: Autor

#### 4.4.3 Energia gasta no período de uso

Sabendo-se que um grande diferencial, no período de utilização, entre os dois sistemas é o conforto térmico, aplicou-se uma comparação de gasto energético ao utilizar o condicionamento artificial. Essa comparação foi feita aplicando uma simulação, no *software Design Builder*, para 1m<sup>2</sup> de cobertura durante 50 anos de uso da habitação tanto com a presença do telhado verde quanto do cerâmico convencional.

Para o telhado convencional teve-se um efeito de 3240 MJ, enquanto para a cobertura verde resultou-se em 1760 MJ, mostrando uma redução de 45,6%, que pode ser explicada pela maior resistência térmica apresentada pelo telhado verde, o que gerou um melhor desempenho térmico para a residência.

Tais valores de energia foram convertidos, posteriormente, de MJ para KWh para serem usados como dados de entrada no software e se adequar às aplicações.

#### 4.5 Aplicação dos dados no *Software*

Com os quantitativos do inventário definidos, torna-se possível a aplicação dessas informações como dados de entrada para a análise de ciclo de vida, no *software SimaPro*.

Dessa forma, foi selecionado o método *ReCiPe 2016*, elaborado pelo Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente dos Países baixos (*RIVM*, sigla em inglês). Visando o mesmo objetivo, também foram usados os bancos de dados *Ecoinvent 3*, já presentes no *software SimaPro*.

Com todas as bibliotecas e dados necessários para a aplicação do método, foi possível dar início ao processo de análise de ciclo de vida pelo *SimaPro*.

O primeiro passo foi exatamente decidir os bancos de dados do *software*, selecionando o nível de “unidade” para que os conceitos apresentassem um maior grau de detalhamento.

Em seguida, deu-se o processo de montagem das fases do produto no *software*, iniciando-se com a etapa de produção, na qual os dados dos inventários foram adicionados ao programa para começar a “construção” do sistema, tanto para o telhado convencional quanto para o telhado verde. A aplicação dos dados no *software*, de ambas as coberturas estão demonstradas nas figuras 8 e 9.

Figura 8: Dados de entrada para etapa de produção do telhado convencional.

Editar montagem 'TELHADO CONVENCIONAL - PRODUÇÃO'

**Entrada/saída** | Parâmetros

Nome: TELHADO CONVENCIONAL - PRODUÇÃO Estado: Nenhum Comentário:

| Materiais/Montagens                                                                                | Quantidade | Unidade | Distribuição |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------------|
| Cement, unspecified (BR)  cement, all types to generic market for cement, unspecified   Cut-off, U | 41,2       | kg      | Indefinido   |
| Gravel, round (RoW)  market for gravel, round   Cut-off, U                                         | 120        | kg      | Indefinido   |
| Sand (RoW)  market for sand   Cut-off, U                                                           | 111        | kg      | Indefinido   |
| Ceramic tile (RoW)  ceramic tile production   Cut-off, U                                           | 86,2       | kg      | Indefinido   |
| Structural timber (RoW)  market for structural timber   Cut-off, U                                 | 0,0552     | m3      | Indefinido   |
| Reinforcing steel (RoW)  reinforcing steel production   Cut-off, U                                 | 3,5        | kg      | Indefinido   |
| (Insira linha aqui)                                                                                |            |         |              |

| Processos                                                                   | Quantidade | Unidade | Distribuição | SD^2 | Min | Máx |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------------|------|-----|-----|
| Electricity, high voltage (RoW)  electricity production, hydro, pumped stor | 0,75       | kWh     | Indefinido   |      |     |     |
| (Insira linha aqui)                                                         |            |         |              |      |     |     |

Image

Fonte: Autor

Figura 9: Dados de entrada para etapa de produção do telhado verde.

Editar montagem 'TELHADO VERDE - PRODUÇÃO'

**Entrada/saída** | Parâmetros

Nome: TELHADO VERDE - PRODUÇÃO Estado: Nenhum Comentário:

| Materiais/Montagens                                                                                        | Quantidade | Unidade | Distribuição |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|--------------|
| Gravel, round (RoW)  market for gravel, round   Cut-off, U                                                 | 27,4       | kg      | Indefinido   |
| Particle board, for outdoor use (RoW)  particle board production, for outdoor use   Cut-off, U             | 0,0203     | m3      | Indefinido   |
| Polyurethane, flexible foam (RER)  market for polyurethane, flexible foam   Cut-off, U                     | 0,18       | kg      | Indefinido   |
| Polyethylene, high density, granulate (RoW)  polyethylene production, high density, granulate   Cut-off, U | 0,09       | kg      | Indefinido   |
| Sand (RoW)  market for sand   Cut-off, U                                                                   | 0,48       | kg      | Indefinido   |
| Structural timber (RER)  market for structural timber   Cut-off, U                                         | 0,0212     | m3      | Indefinido   |
| Compost (RoW)  treatment of garden biowaste, home composting in heaps   Cut-off, U                         | 32,1       | kg      | Indefinido   |
| (Insira linha aqui)                                                                                        |            |         |              |

| Processos           | Quantidade | Unidade | Distribuição | SD^2 | Min | Máx |
|---------------------|------------|---------|--------------|------|-----|-----|
| (Insira linha aqui) |            |         |              |      |     |     |

Image

Fonte: Autor

Um processo similar foi feito tanto para a etapa de uso quanto para a etapa de descarte. Entretanto, para estas, o próprio *software* consegue reutilizar os dados já aplicados no processo de produção, como demonstrado na figura 10.

Figura 10: Dados de entrada para etapa de uso do telhado convencional.

Fonte: Autor

Em sequência, teve-se de selecionar o método de avaliação *ReCiPe 2016 Endpoint* (Figura 11) visto que o objetivo de estudo está nos resultados gerais dos impactos analisados por este método.

Nessa etapa, também se optou por considerar apenas a análise dos materiais, pois o foco dessa comparação não se aprofunda tanto em detalhes de execução ou infraestrutura.

Figura 11 - Seleção do método de avaliação da análise.

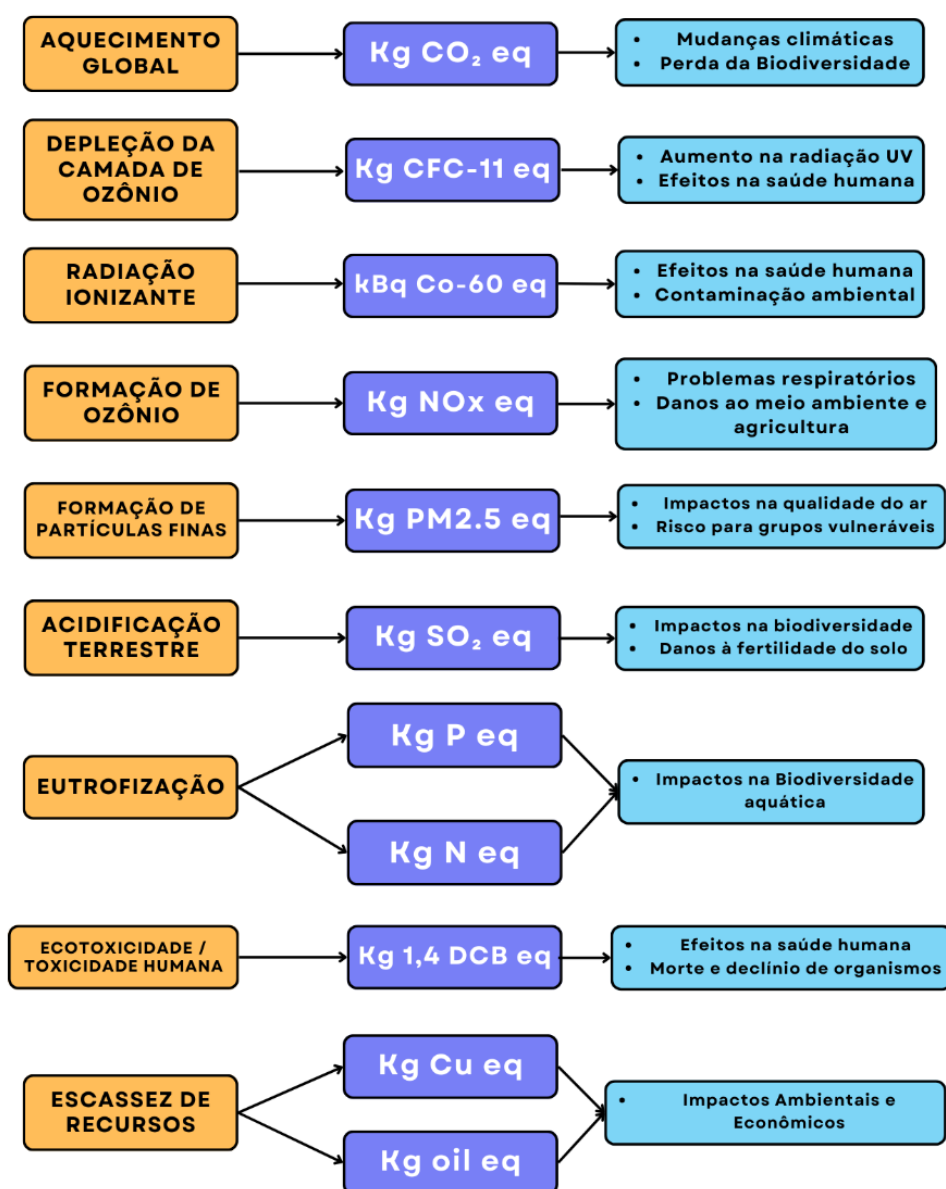
Fonte: Autor

Com todos esses procedimentos aplicados, foi possível conduzir a avaliação de impactos do ciclo de vida dos materiais propostos e receber os dados categorizados conforme foram pré-definidos pelo método escolhido

#### 4.6 Avaliação dos impactos e interpretação

Apesar de ser uma versão demo, o *software* utilizado oferece uma extensa gama de métodos de análise aplicáveis a diversas regiões do mundo. Para se realizar essa comparação, é necessário, inicialmente, compreender de que maneira cada impacto pode afetar o meio ambiente e a vida humana. A Figura 12 apresenta uma explicação clara sobre esses impactos.

Figura 12 - Consequências dos impactos gerados



Fonte: Autor

A interpretação adotada neste trabalho consistiu em comparações de valores, visto que o foco principal deste é a aplicação e estudo de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e análise dos impactos.

Dessa forma, foram retirados os dados de saída, entregues pelo *software*, conforme a Figura 13, de cada uma das etapas da análise, tanto do telhado verde quanto do telhado convencional, com o propósito de aplicar a comparação desses resultados e ter-se uma noção do quanto uma alternativa pode ser prejudicial em relação à outra e, com isso, apresentar uma conclusão final para definir qual alternativa seria mais sustentável em relação à escolha dos materiais.

Figura 13: Dados de saída para o telhado convencional na fase de produção

| Se                                  | Categoria de impacto                    | Unidade      | Totalt  | Cement, unspecified | Gravel, round (RoW) | Sand (RoW) market for | Ceramic tile (RoW) | Reinforcing steel (RoW) | Electricity, high voltage | Stru. tim |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Global warming                          | kg CO2 eq    | 104     | 28,3                | 1,22                | 1,18                  | 57,1               | 7,97                    | 0,799                     | 7,59      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Stratospheric ozone depletion           | kg CFC11 eq  | 2,71E-5 | 4,99E-6             | 4,05E-7             | 3,84E-7               | 1,53E-5            | 9,95E-7                 | 2,51E-7                   | 4,77      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Ionizing radiation                      | kBq Co-60 eq | 3,56    | 0,0874              | 0,0305              | 0,0214                | 2,95               | 0,157                   | 0,0153                    | 0,25      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Ozone formation, Human health           | kg NOx eq    | 0,282   | 0,0832              | 0,0072              | 0,00789               | 0,113              | 0,016                   | 0,00171                   | 0,05      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Fine particulate matter formation       | kg PM2.5 eq  | 0,894   | 0,0235              | 0,00205             | 0,00204               | 0,83               | 0,0109                  | 0,00226                   | 0,02      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Ozone formation, Terrestrial ecosystems | kg NOx eq    | 0,291   | 0,0848              | 0,00741             | 0,00811               | 0,119              | 0,0166                  | 0,00177                   | 0,05      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Terrestrial acidification               | kg SO2 eq    | 0,287   | 0,0637              | 0,0045              | 0,0045                | 0,163              | 0,0183                  | 0,00253                   | 0,03      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Freshwater eutrophication               | kg P eq      | 0,0329  | 0,00036             | 0,000185            | 0,000133              | 0,0258             | 0,00355                 | 0,000406                  | 0,00      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Marine eutrophication                   | kg N eq      | 0,00263 | 0,000313            | 2E-5                | 1,2E-5                | 0,00175            | 0,000315                | 2,45E-5                   | 0,00      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Terrestrial ecotoxicity                 | kg 1,4-DCB   | 1,99E3  | 67,8                | 11,1                | 10,4                  | 201                | 1,65E3                  | 0,644                     | 50,3      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Freshwater ecotoxicity                  | kg 1,4-DCB   | 3,52    | 0,0718              | 0,00836             | 0,00594               | 2,56               | 0,783                   | 0,0105                    | 0,06      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Marine ecotoxicity                      | kg 1,4-DCB   | 6,79    | 0,0902              | 0,0165              | 0,0141                | 3,59               | 2,92                    | 0,015                     | 0,14      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Human carcinogenic toxicity             | kg 1,4-DCB   | 28,1    | 0,18                | 0,0439              | 0,0379                | 4,12               | 23,4                    | 0,0471                    | 0,27      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Human non-carcinogenic toxicity         | kg 1,4-DCB   | 119     | 2,2                 | 0,413               | 0,344                 | 103                | 6,48                    | 0,542                     | 5,33      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Land use                                | m2a crop eq  | 99      | 0,549               | 0,149               | 0,565                 | 1,34               | 0,0826                  | 0,0137                    | 96,3      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Mineral resource scarcity               | kg Cu eq     | 2,62    | 0,0669              | 0,000309            | 0,000329              | 2,27               | 0,284                   | 3,58E-5                   | 0,00      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Fossil resource scarcity                | kg oil eq    | 24,7    | 2,95                | 0,347               | 0,341                 | 17                 | 1,76                    | 0,213                     | 2,08      |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Water consumption                       | m3           | 0,938   | 0,112               | 0,169               | 0,117                 | 0,434              | 0,0692                  | 0,00513                   | 0,03      |

A analisar 1 p TELHADO CONVENCIONAL - PRODUÇÃO; Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.09 / World (2010) H / Caracterização / A excluir processos de infra-estrutura

Faculty (Demo) 9.6.0.1 Faculty

Fonte: Autor

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS FINAL

Após a aplicação de todos os dados de entrada e execução dos cálculos pelo *software SimaPro*, foi possível empregar a comparação dos resultados dos impactos totais gerados por ambos os sistemas de coberturas.

Para que tal avaliação pudesse ser aplicada de maneira organizada e clara, decidiu-se separá-la em três etapas de comparação, sendo elas: Etapa de Produção, Etapa de Uso e Etapa de Descarte.

### 5.4 Etapa de Produção

#### 5.4.3 Influência dos materiais

Os primeiros resultados da análise foram retirados da etapa de **produção** de ambas coberturas. Os dados de saída foram sintetizados pelo *SimaPro* em gráficos, que representam os impactos gerados por cada componente do sistema, como mostrados nas figuras 14 e 15.

Figura 14: Impactos gerados pelos componentes do Telhado Verde.

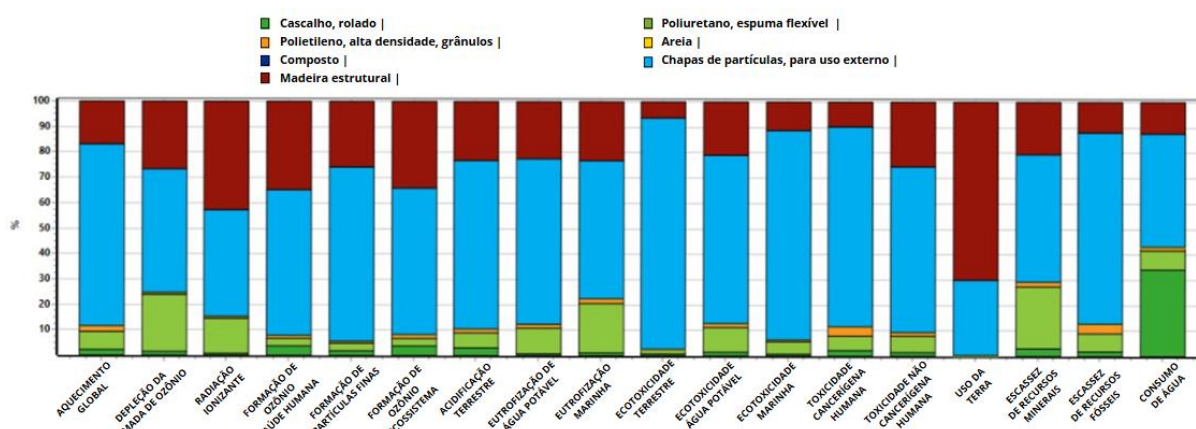
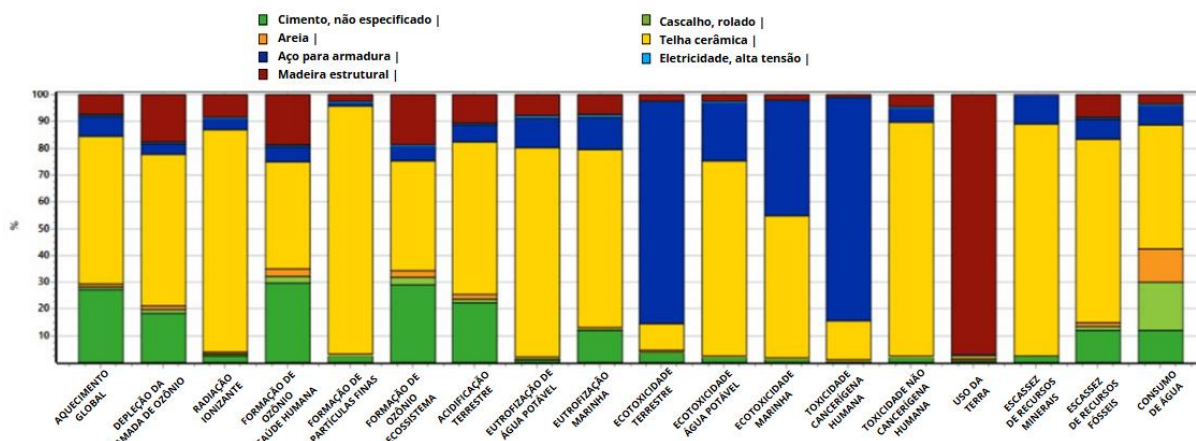


Figura 15: Impactos gerados pelos componentes do Telhado Convencional.



Fonte: Autor

Ao se observar inicialmente os gráficos, nota-se um maior valor de influência, em impactos, de certos materiais em comparação a outros. Um exemplo evidente dessa observação é o fato de que as **chapas de partículas** da cobertura verde (Figura 14) atuam significativamente para a **ecotoxicidade terrestre** ao se comparar aos outros materiais.

Essas observações podem ser aplicadas para apresentar qual tipo de material poderá ser substituído para diminuição de certas influências no desempenho do sistema e nos impactos ocasionados pelo uso de tais materiais.

Da mesma forma, podem ser apresentados como indicadores para possíveis novas pesquisas específicas de materiais, com a finalidade de criar novas alternativas menos nocivas ao planeta.

### 5.1.2 Categorias de impacto

Apesar dos gráficos apresentados anteriormente nos mostrarem quais materiais são mais influentes para cada impacto ambiental, não podem ser utilizados para uma comparação entre sistemas, visto que suas porcentagens são confrontadas entre os materiais de um mesmo grupo. Desse modo, o *software* também proporciona valores **totais** que podem ser comparados com outras aplicações, como visto na Tabela 3.

Tabela 3: Valores totais dos impactos gerados por ambas coberturas – Etapa de Produção.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | UNIDADE      | T. VERDE   | T. CONV.  |
|---------------------------------------------|--------------|------------|-----------|
| Aquecimento Global                          | kg CO2 eq    | 11,6       | 104       |
| Depleção da camada de ozônio                | kg CFC11 eq  | 0,00000655 | 0,0000271 |
| Radiação Ionizante                          | kBq Co-60 eq | 0,814      | 3,56      |
| Formação de ozônio, saúde humana            | kg NOx eq    | 0,0439     | 0,282     |
| Formação de partículas finas                | kg PM2.5 eq  | 0,0246     | 0,894     |
| Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres | kg NOx eq    | 0,0471     | 0,291     |
| Acidificação terrestre                      | kg SO2 eq    | 0,034      | 0,287     |
| Eutrofização de água potável                | kg P eq      | 0,00453    | 0,0329    |
| Eutrofização marinha                        | kg N eq      | 0,000392   | 0,00263   |
| Ecotoxicidade terrestre                     | kg 1,4-DCB   | 274        | 1990      |
| Ecotoxicidade de água potável               | kg 1,4-DCB   | 0,126      | 3,52      |
| Ecotoxicidade marinha                       | kg 1,4-DCB   | 0,408      | 6,79      |
| Toxicidade cancerígena humana               | kg 1,4-DCB   | 0,466      | 28,1      |
| Toxicidade não cancerígena humana           | kg 1,4-DCB   | 6,85       | 119       |
| Uso da terra                                | m2a crop eq  | 26,5       | 99        |
| Escassez de recursos minerais               | kg Cu eq     | 0,0024     | 2,62      |
| Escassez de recursos fósseis                | kg oil eq    | 4,69       | 24,7      |
| Consumo de água                             | m3           | 0,114      | 0,938     |

Fonte: Autor

Assim, torna-se possível a comparação entre as duas coberturas, de maneira ampla e objetiva.

Na etapa de produção, observa-se que, na maioria das categorias de impacto, a cobertura convencional, embora com valores não muito expressivos, apresenta índices superiores quando comparada aos resultados do telhado verde. Isso indica que, nesta fase, o telhado composto pelo modelo tradicional de telhas cerâmicas configura-se como uma opção menos sustentável em relação ao telhado verde.

A categoria que demonstra a maior diferença nos valores totais de impacto é a ecotoxicidade terrestre, sendo que, ao voltar-se para o gráfico da Figura 15, constata-se uma significativa influência proveniente da produção do aço. Essa relação pode ser constatada pois a produção de metal pode gerar resíduos e poluentes no processo, como escória, metais pesados, óxidos de enxofre e nitrogênio que contribuem com o processo de ecotoxicidade terrestre

## 5.5 Etapa de uso

Na fase de utilização, observa-se que os valores não apresentam variações significativas, embora, em sua maioria, o telhado convencional apresente valores relativamente inferiores (Tabela 4).

Tabela 4: Valores totais dos impactos gerados por ambas coberturas – Etapa de Uso.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | UNIDADE      | T. VERDE | T. CONV. |
|---------------------------------------------|--------------|----------|----------|
| Aquecimento Global                          | kg CO2 eq    | 970      | 625      |
| Depleção da camada de ozônio                | kg CFC11 eq  | 0,000308 | 0,000191 |
| Radiação Ionizante                          | kBq Co-60 eq | 19,2     | 13,5     |
| Formação de ozônio, saúde humana            | kg NOx eq    | 2,1      | 1,4      |
| Formação de partículas finas                | kg PM2.5 eq  | 2,74     | 2,37     |
| Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres | kg NOx eq    | 2,17     | 1,44     |
| Acidificação terrestre                      | kg SO2 eq    | 3,07     | 1,94     |
| Eutrofização de água potável                | kg P eq      | 0,491    | 0,297    |
| Eutrofização marinha                        | kg N eq      | 0,0298   | 0,0186   |
| Ecotoxicidade terrestre                     | kg 1,4-DCB   | 1050     | 2410     |
| Ecotoxicidade de água potável               | kg 1,4-DCB   | 12,7     | 10,4     |
| Ecotoxicidade marinha                       | kg 1,4-DCB   | 18,4     | 16,6     |
| Toxicidade cancerígena humana               | kg 1,4-DCB   | 57       | 58,8     |
| Toxicidade não cancerígena humana           | kg 1,4-DCB   | 657      | 472      |
| Uso da terra                                | m2a crop eq  | 42,8     | 108      |
| Escassez de recursos minerais               | kg Cu eq     | 0,0453   | 2,65     |
| Escassez de recursos fósseis                | kg oil eq    | 261      | 164      |
| Consumo de água                             | m3           | 6,26     | 4,28     |

Fonte: Autor

Essa semelhança nos valores pode ser justificada pelo fato de que a maioria dos materiais utilizados possui origem semelhante, predominantemente madeira. As exceções ficam por conta da cerâmica e do concreto empregados no telhado convencional.

É relevante considerar a presença de material orgânico no telhado verde, o qual, na ausência de manutenção adequada, pode desencadear processos de lixiviação ao longo do tempo de uso.

### 5.3 Etapa de Descarte

A última das etapas ainda foi analisada em duas situações, sendo uma o descarte total dos sistemas e a outra constituída pela reciclagem total dos materiais, com a intenção de entender como o *software* traduziria tais situações

#### 5.3.1 Descarte total

Ao analisar o descarte total do sistema, observa-se, de maneira geral, que os valores obtidos para o sistema de cobertura convencional são mais elevados (Tabela 5). Esse resultado é esperado, uma vez que a maior parte dos materiais no modelo de telhado verde é de origem orgânica ou não apresenta características poluentes.

Tabela 5: Valores totais dos impactos gerados por ambas coberturas – Descarte Total.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | UNIDADE      | T. VERDE  | T. CONV.  |
|---------------------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| Aquecimento Global                          | kg CO2 eq    | 39,9      | 154       |
| Depleção da camada de ozônio                | kg CFC11 eq  | 0,0000055 | 0,0000213 |
| Radiação Ionizante                          | kBq Co-60 eq | 0,0365    | 0,144     |
| Formação de ozônio, saúde humana            | kg NOx eq    | 0,00591   | 0,0274    |
| Formação de partículas finas                | kg PM2.5 eq  | 0,00253   | 0,0108    |
| Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres | kg NOx eq    | 0,00614   | 0,0284    |
| Acidificação terrestre                      | kg SO2 eq    | 0,00607   | 0,0255    |
| Eutrofização de água potável                | kg P eq      | 0,171     | 0,656     |
| Eutrofização marinha                        | kg N eq      | 0,0617    | 0,225     |
| Ecotoxicidade terrestre                     | kg 1,4-DCB   | 4,11      | 17,8      |
| Ecotoxicidade de água potável               | kg 1,4-DCB   | 28,9      | 112       |
| Ecotoxicidade marinha                       | kg 1,4-DCB   | 38,2      | 148       |
| Toxicidade cancerígena humana               | kg 1,4-DCB   | 0,659     | 26,2      |
| Toxicidade não cancerígena humana           | kg 1,4-DCB   | 672       | 2620      |
| Uso da terra                                | m2a crop eq  | 0,0833    | 0,298     |
| Escassez de recursos minerais               | kg Cu eq     | 0,000501  | 0,0023    |
| Escassez de recursos fósseis                | kg oil eq    | 0,403     | 1,75      |
| Consumo de água                             | m3           | -0,228    | -0,865    |

Fonte: Autor

Ao examinar as diferenças mais significativas entre as categorias, destacam-se as discrepâncias relacionadas à depleção da camada de ozônio, à toxicidade não cancerígena humana e à ecotoxicidade terrestre. A justificativa para esses valores elevados pode estar relacionada ao descarte inadequado de materiais, como a incineração ou o despejo em locais não controlados, os quais podem liberar substâncias químicas no ambiente, prejudicando a camada de ozônio. Além disso, esses descartes podem contaminar o solo com metais pesados ou liberar partículas de sílica, impactando negativamente a saúde do solo, das plantas, dos organismos terrestres e, eventualmente, dos seres humanos.

### 5.3.2 Reciclagem

Por fim, ao se analisar a etapa de reciclagem total, levou-se em consideração uma situação hipotética para visualização e estudo do processo utilizado.

Nesse contexto, a primeira característica observada foram os valores negativos gerados pelo *software* (Tabela 6). Tais valores podem indicar que o efeito da ação ou do projeto está sendo calculado de forma a demonstrar uma redução ou benefício ambiental.

Tabela 6: Valores totais dos impactos gerados por ambas coberturas – Etapa de Reciclagem.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | UNIDADE      | T. VERDE    | T. CONV.   |
|---------------------------------------------|--------------|-------------|------------|
| Aquecimento Global                          | kg CO2 eq    | -11,6       | -104       |
| Depleção da camada de ozônio                | kg CFC11 eq  | -0,00000655 | -0,0000271 |
| Radiação Ionizante                          | kBq Co-60 eq | -0,814      | -3,56      |
| Formação de ozônio, saúde humana            | kg NOx eq    | -0,0439     | -0,282     |
| Formação de partículas finas                | kg PM2.5 eq  | -0,0246     | -0,894     |
| Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres | kg NOx eq    | -0,0471     | -0,291     |
| Acidificação terrestre                      | kg SO2 eq    | -0,034      | -0,287     |
| Eutrofização de água potável                | kg P eq      | -0,00453    | -0,0329    |
| Eutrofização marinha                        | kg N eq      | -0,000392   | -0,00263   |
| Ecotoxicidade terrestre                     | kg 1,4-DCB   | -274        | -1990      |
| Ecotoxicidade de água potável               | kg 1,4-DCB   | -0,126      | -3,52      |
| Ecotoxicidade marinha                       | kg 1,4-DCB   | -0,408      | -6,79      |
| Toxicidade cancerígena humana               | kg 1,4-DCB   | -0,466      | -28,1      |
| Toxicidade não cancerígena humana           | kg 1,4-DCB   | -6,85       | -119       |
| Uso da terra                                | m2a crop eq  | -26,5       | -99        |
| Escassez de recursos minerais               | kg Cu eq     | -0,0024     | -2,62      |
| Escassez de recursos fósseis                | kg oil eq    | -4,69       | -24,7      |
| Consumo de água                             | m3           | -0,114      | -0,938     |

Fonte: Autor

No âmbito da análise de ciclo de vida, um impacto ambiental negativo pode ser interpretado como um efeito positivo, por exemplo, uma ação que resulta em uma diminuição da poluição ou maior restauração ambiental.

Dessa forma, o "impacto negativo" gerado pela reciclagem é apresentado com o intuito de neutralizar ou compensar impactos ambientais previamente causados, o que, por consequência, representa uma vantagem para o meio ambiente.

Ao analisar as categorias de impacto resultadas da avaliação de ciclo de vida realizada no *SimaPro*, observa-se que os valores maiores, provenientes do modelo de cobertura convencional, indicam que, caso fosse possível realizar uma reciclagem de todo o material usado, o impacto ambiental seria mais relevante em comparação com os resultados do telhado verde, considerando que a maioria dos materiais deste não apresentam características poluentes.

## 6. CONCLUSÃO

O objetivo central deste trabalho consistiu em aprofundar os conhecimentos sobre os processos de análise do ciclo de vida e explorar sua aplicação em uma situação prática. Esse desenvolvimento demandou tempo e diversas tentativas para identificar a abordagem mais adequada e viável, de modo que o trabalho não se tornasse excessivamente complexo, mas, ao mesmo tempo, apresentasse coesão e agregasse valor significativo.

Dessa forma, optou-se por aplicar a Análise de Ciclo de Vida para comparar, de maneira abrangente, os sistemas de telhado convencional e telhado verde entre si (embora o processo mais correto seria procurar algum parâmetro de referência para essa comparação) com o intuito de considerar diversas categorias e realizar um contraste mais amplo. Utilizando o *software SimaPro*, foi possível realizar a análise e compreender como esse estudo é aplicado. Ao final, após a aplicação da metodologia e a realização das análises conforme as possibilidades disponíveis, observou-se que, sob a ótica da sustentabilidade, o telhado verde se apresenta como uma opção melhor comparado ao sistema convencional.

Outro ponto relevante identificado foi o elevado impacto da ecotoxicidade terrestre, cujos valores se destacaram em todas as etapas da análise, apresentando números significativamente superiores às demais categorias. Esse resultado é traduzido pelas atividades de mineração de argila utilizada na fabricação das telhas, que pode ocasionar degradação do solo e a liberação de substâncias tóxicas, além de poluentes gerados durante o processo de fabricação, que contribuem para a acidificação do solo. Adicionalmente, o descarte inadequado das telhas pode levar à contaminação do solo, impactando negativamente a fauna e flora locais.

Um aspecto passível de aprimoramento nesta pesquisa é a limitada consideração dada às energias de formação dos materiais, fator que exerce influência significativa nesse tipo de avaliação e que deve ser incorporado à análise de forma mais criteriosa. Ademais, é recomendável a definição de um parâmetro padrão para as comparações, uma vez que, para que um impacto seja considerado prejudicial ao meio ambiente, não é necessário que seus valores sejam inferiores aos de outro, mas sim que ultrapassem um limite comum previamente estabelecido.

Dessa maneira entende-se que ainda que, no quesito sustentabilidade, tem-se um resultado melhor com o telhado verde em comparação ao telhado cerâmico, porém ainda há muitas outras possibilidades de se explorar esse tema.

Após essa análise geral, surgem inúmeros outros questionamentos, como, por exemplo, quais categorias de impactos podem ser amenizadas, ou quais materiais podem ser substituídos por alternativas que apresentem menores impactos ambientais. É possível aprofundar o estudo de cada impacto de maneira mais detalhada e específica, como exemplificado no trabalho utilizado como referência para este estudo.

Dessa forma, várias outras investigações, com base neste raciocínio, podem ser realizadas, explorando ainda mais profundamente o tema, utilizando este e outras fontes como alicerce.

Isso pois, uma das dificuldades de se confeccionar e produzir este trabalho foi encontrar pesquisas que utilizassem uma linguagem acessível, tanto para a compreensão de conceitos avançados quanto para a aplicação prática dos métodos, com o uso de *softwares* e técnicas. Portanto, espera-se que este artigo não apenas proporcione uma maneira mais clara de entender a aplicação da Análise do Ciclo de Vida em modelos próximos à realidade, mas também incitar e auxiliar em novas pesquisas no ramo estudado da sustentabilidade.

## REFERÊNCIAS

BONI, Filipe. Telhado Verde: O Guia Completo. UGREEN, 2016. Disponível em: <<https://www.ugreen.com.br/telhado-verde/>>. Acesso em: 05 de dez. de 2023.

CASTLETON, H.F.; STOVIN V.; BECK S.B.M.; DAVISON J.B. *Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. Energy and Buildings*. UK. 2010.

CHERNANI, S.B.; LEHVÄVIRTHA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*. EUA. 2015.

HENEINE, M. C. A. S. Cobertura Verde. 2008. 49 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C.D.; BATISTA, J.O. Casa eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2010. PINTO, E. M. A. Gestão de Recursos Hídricos e as Interferências do Sistema Urbano: município de Queimados – RJ. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Humanas e Sociais*, Rio de Janeiro. 2007.

LIRA, Júlia Santiago de Matos Monteiro. Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional. 2017. Dissertação - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

SAIZ, S.; KENNEDY, C.; BASS, B.; PRESSNAIL, K. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environ. Sci. Technol*. 2006.

SILVA, Vinicius Luís Arcangelo. A importância do uso ergonômico da cor na interface ambiente x usuário. 1º Congresso Nacional de Ergonomia Aplicada. Bauru. 2016.

TASSI, R.; TASSINARI, L.C.S.; PICCILLI, D.G.A.; PERSCH, C.G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria. Santa Maria. 2013.