ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Desempenho ambiental de telhado verde para edificações

Environmental performance of green roofs for buildings

Kaio Sales de Tancredo Nunes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana | Feira de Santana | Brasil | kaiosaleseng@gmail.com
Sheila Miranda Correia Souza
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana| Feira de Santana|Brasil|sheilamiranda725@gmail.com
Diego Lima Medeiros
Universidade Federal do Maranhão | Balsas | Brasil | diego.lm@ufma.br
Susane Eterna Leite Medeiros
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental | Departamento de Tecnologia | Universidade Estadual de Feira de Santana | Feira de Santana | Brasil | selmedeiros@uefs.br
Tiago Assunção Santos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental | Departamento de Tecnologia | Universidade Estadual de Feira de Santana | Feira de Santana | Brasil | tiagoassuncao@hotmail.com

Resumo

As construções verdes são alternativas que visam reduzir os impactos ambientais do ambiente construído, das quais destacou-se neste trabalho o telhado verde. É essencial se determinar os impactos ambientais que a construção de um telhado verde pode acarretar para compreender os seus potenciais benefícios ao meio ambiente. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar os impactos ambientais da produção e uso de 1 m² de telhado verde em comparação a um telhado convencional. Seguindo os padrões ISO 14040/14044, foram definidos os objetivos e o escopo do estudo, realizado o inventário de entradas/saídas, caracterizados os impactos ambientais e analisados os resultados. Utilizando o *software* openLCA 2.0®, calcularam-se os impactos ambientais nas categorias de potencial de aquecimento global em 100 anos, toxicidade humana e depleção abiótica de combustíveis fósseis. Apesar da maior necessidade de recursos na construção, o telhado verde mostrou-se ambientalmente vantajoso, com potencial para reduzir impactos na construção civil. Com os resultados observados confirmou-se a viabilidade ambiental dos telhados verdes, e forneceu-se informações de apoio ao aprimoramento contínuo dessa tecnologia de construção.

Palavras-chave: Construção verde. Avaliação do ciclo de vida (ACV). Impactos ambientais.

Abstract

Green buildings are alternatives aimed at reducing the environmental impacts of the built environment, among which green roofs are highlighted in this study. It is essential to determine

Como citar:
NUNES, K. S. T. *et al*. Desempenho ambiental de telhado verde para edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

the environmental impacts that the construction of a green roof can cause to understand its potential benefits to the environment. Therefore, the objective of this study was to evaluate the environmental impacts of the production and use of 1 m² of green roof compared to a conventional roof. Following ISO 14040/14044 standards, the study objectives and scope were defined, an inventory of inputs/outputs was conducted, environmental impacts were characterized, and the results were analyzed. Using the software openLCA 2.0®, environmental impacts were calculated in the categories of 100-year global warming potential, human toxicity, and abiotic depletion of fossil fuels. Despite the greater resource requirement in construction, the green roof proved to be environmentally advantageous, with the potential to reduce impacts in civil construction. The observed results confirmed the environmental feasibility of green roofs and provided information to support the continuous improvement of this construction technology.

Keywords: Green building. Life cycle assessment (LCA). Environmental impacts.

INTRODUÇÃO

A presença de arborização e áreas verdes nas cidades é essencial para a melhoria das condições de vida da população, seja no condicionamento da qualidade do ar ou na sensação térmica dos locais. Entretanto, com a urbanização, a densificação das construções tem limitado a presença de áreas verdes. [1]

A urgência atual para inserir os conceitos sustentáveis na construção civil ocorre devido à grande proporção dos impactos ambientais correlacionados. De acordo com o relatório da situação global para edificações e construção de 2022, após a pandemia do COVID-19, mais especificamente em 2021, a atividade da construção civil voltou rapidamente para níveis pré-pandemia. Menciona-se que como consequência dessas atividades acarretaram-se impactos como o aumento de emissão de CO_2 oriundos do uso de edificações, ocorrendo uma máxima histórica de 10 $GtCO_2$ (gigatoneladas de dióxido de carbono), valor 2% maior que o último pico em 2019. Ao se considerar também as emissões da produção dos materiais de construção, as construções representaram 37% das emissões globais de CO_2 em 2021. [2]

Quanto ao uso de energia em edificações, a proporção consiste em 30% do consumo final de energia globalmente, e, aumentando para 34% caso se considere o consumo de energia associado à produção de materiais de construção. [3]

Uma das estratégias para mitigar as mudanças destes impactos ambientais oriundos da construção civil é a instalação de telhados verdes, que são telhados com cobertura vegetal.

O telhado verde tem se destacado ultimamente devido aos seus benefícios para o meio ambiente. Esses benefícios estão relacionados à economia energética e a redução de custos associados ao menor uso de condicionadores de ar. [4]

O telhado verde é composto por estruturas de suporte, membrana impermeabilizante de alta qualidade, barreira contra raízes, camada de drenagem, camada de estoque de água, camada de filtragem, um substrato e vegetação no topo. [5]

Uma avaliação integrada dos impactos e benefícios ambientais do telhado verde é uma forma de contribuir para o avanço do desenvolvimento desse tipo de infraestrutura verde para modelos cada vez mais sustentáveis. [6]

Dentre as pesquisas que analisam os aspectos do telhado verde, [7] conduziram uma análise de seu ciclo de vida no contexto de países de baixa renda no sul do planeta. Os

autores concluíram que mitigar os impactos do telhado verde é possível por meio da adoção de materiais reciclados, materiais leves para as camadas, melhorias nas camadas com maiores impactos ambientais e uso de produtos locais para reduzir os impactos do transporte.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho ambiental de telhados verdes para utilização em edificações. Para isto, foi realizada a quantificação das categorias de impacto ambiental do potencial de aquecimento global, toxicidade humana e depleção abiótica de combustíveis fósseis.

METODOLOGIA

Este estudo seguiu os padrões de gestão ambiental da ISO 14040 e 14044 para avaliação do ciclo de vida (ACV). O método de avaliação do desempenho ambiental do telhado verde seguiu procedimentos análogos à métodos comuns de elaboração de análises de ciclo de vida, consistindo nas etapas: 1) definição de objetivo e escopo, 2) inventário de entradas e saídas, 3) caracterização dos impactos e 4) interpretação. Um aspecto de interesse deste trabalho foi incluir os valores de remoção de poluentes proporcionadas pela vegetação no topo do telhado verde, quantificando-os de acordo com o poluente removido por um determinado tempo.

Os potenciais impactos do telhado verde foram comparados com os de um telhado convencional, baseando-se em categorias de impacto. Para obter os resultados foi utilizado o *software* openLCA® 2.0, com o método CML 2001.

OBJETIVO E ESCOPO

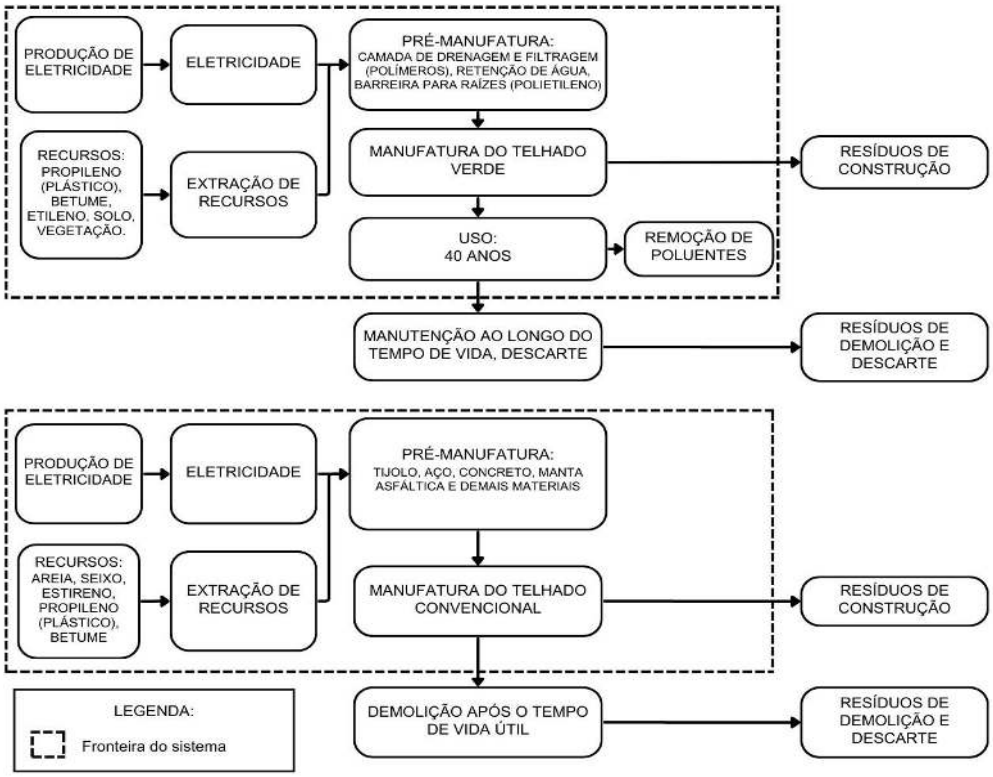
O objetivo consistiu em selecionar etapas da manufatura e uso de 1 m² de telhado verde, e da manufatura de 1 m² telhado convencional, conforme apresentado no sistema de produto da Figura 1, no qual é possível observar as etapas ao longo do ciclo de vida, desde as entradas, processamentos e saídas.

Vale ressaltar que o presente estudo não considerou os impactos causados pelo transporte de recursos ao longo da fronteira do sistema, pois não foi escolhido um local específico de transporte desses recursos para construção do telhado verde.

Também não se considerou os impactos do processo de instalação do telhado, visto que é um aspecto técnico que pode variar de acordo com a altura, forma ou posição do telhado. Ademais, a manutenção do telhado verde também não foi considerada, visto que depende do modo de uso, tipo de vegetação e condições climáticas.

Pela baixa disponibilidade de dados quantitativos para potenciais vantagens do telhado verde, como a conservação da biodiversidade e a economia de energia usada com condicionadores de ar, também não se considerou essas vantagens no escopo.

Figura 1: Sistema de produto do telhado verde e do telhado convencional



Fonte: o autor.

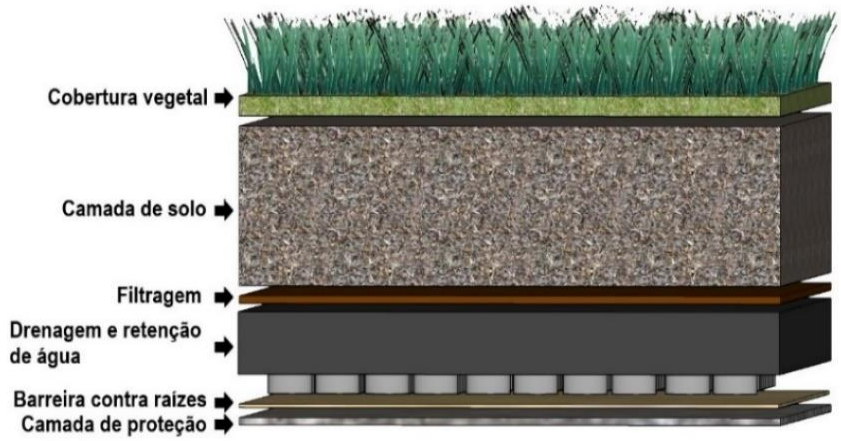
INVENTÁRIO DE ENTRADAS E SAÍDAS

Para se estabelecer os inventários de entradas e saídas, primeiramente foram especificadas as camadas do telhado verde de estudo, obtendo dados quantitativos de seus componentes.

Os quantitativos dos componentes das camadas telhado verde foram obtidos por meio da pesquisa de [8], considerando-se os materiais que tiveram o melhor desempenho ambiental na análise dos autores, contanto que para esses materiais houvessem informações disponíveis na base de dados Ecoinvent 3.6.

As camadas do telhado verde foram então divididas em camada de proteção, barreira contra raízes, camada de drenagem, camada de retenção de água, camada de filtragem, camada de solo e cobertura vegetal, em um sistema de telhado verde extensivo, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Representação das camadas de telhado verde



Fonte: o autor.

Visto que no quantitativo dos componentes feito pelos autores mencionados não foi considerada a cobertura vegetal, para essa camada foi utilizado o valor adotado por [7]. Além das camadas específicas do telhado verde, também se considerou a utilização uma base de sustentação para o telhado adaptada de [9]

A espessura de cada camada, componentes e quantitativos, dados em peso por unidade de área (m²), utilizados para a composição de 1 m² de telhado verde estão descritos na Tabela 1, assim como as fontes dessas informações.

Tabela 1: Informações sobre o telhado verde de estudo

Camada	Espessura (mm)	Componentes	Peso (kg/m²)	Fonte
Camada de proteção	1,8	Polipropileno não tecido (TNT)	0,3	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Barreira contra raízes	0,4	Polietileno de baixa densidade	0,8	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Camada de drenagem	25	Poliestireno reciclado	1,3	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Camada de filtragem	1,9	Polipropileno não tecido (TNT)	0,15	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Camada de retenção de água	10	Lã mineral reciclada	1,2	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Camada de solo	100	Adubo	15	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
		Areia	15	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
		Pedra-pomes	70	Chenani, Lehvavirta e Hakkinen [8]
Cobertura vegetal	20	Grama	1	Morau, Tsiorimalala e Rakotondramiarana [7]
Base do telhado	100	Tijolo	38,48	El Bachawati *et al*. [9]
		Vergalhão	14,84	El Bachawati *et al*. [9]
		Concreto	486,5	El Bachawati *et al*. [9]

Fonte: o autor.

Os valores quantitativos para remoção de poluentes por meio do telhado verde, conforme observado na Tabela 2, foram baseados na pesquisa [10]. Assim como [8], adotou-se o uso do telhado verde por um período de 40 anos, representativo de sua vida útil. Os poluentes removidos pela vegetação considerados para o presente trabalho foram o dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2), ozônio (O_3) e material particulado de diâmetro inferior a 10 micrômetros (PM_{10}), embasados também no trabalho dos autores mencionados.

Tabela 2: Poluentes removidos ao longo de 1 ano

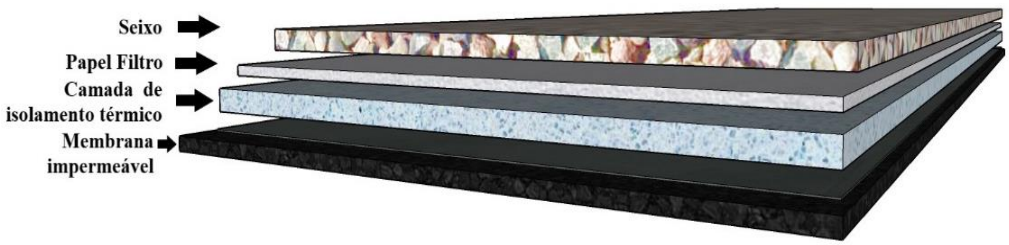
Poluente removido	Quantidade (g/(m².ano))
Dióxido de nitrogênio (NO_2)	2,33
Dióxido de enxofre (SO_2)	0,65
Ozônio (O_3)	4,49
Particulados (PM_{10})	1,12

Fonte: Yang, Yu e Gong. [10]

Para realizar uma análise comparativa, fez-se o levantamento quantitativo dos componentes de um telhado não categorizado como telhado verde, denominado, neste estudo, como telhado convencional. Com esse propósito, utilizou-se o telhado com lastro de cascalho apresentado por [9]. Embora não seja o telhado mais comumente utilizado no Brasil, este tipo de telhado foi selecionado pois os autores também realizaram uma análise comparativa com o telhado verde, o que está alinhado com o objetivo deste estudo.

As camadas que fazem parte do telhado convencional consistem em: uma membrana impermeável, composta por uma manta asfáltica que ajuda o telhado a resistir a danos causados por intempéries; uma camada de isolamento térmico, que protege o concreto dos raios solares e mudanças de temperatura; uma folha de filtro, que previne a circulação de poeira e partículas sólidas na água, evitando o entupimento do sistema de drenagem; e uma camada exterior feita de seixos [9]. Uma representação dessas camadas que compõem o telhado convencional, conforme descrito pelos autores, pode ser observada na Figura 3.

Figura 3: Representação das camadas do telhado convencional



Fonte: o autor.

Convertendo-se as unidades de medida adotadas no trabalho de autores [9], obteve-se os materiais e suas quantidades necessárias para produção de 1 m² do telhado convencional escolhido, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Componentes de 1 m² do telhado convencional

Camada	Material	Peso (kg/m²)
Estrutura do telhado	Tijolo	38,48
	Vergalhão	13,50
	Concreto	486,50
Membrana impermeável	Manta Asfáltica	12,00
Isolamento térmico	Placas de espuma	1,15
Substrato	Papel filtro	1,00
	Seixo	277,95

Fonte: El Bachawati *et al.* [9]

Foram relacionados os componentes do telhado verde e do telhado convencional com os dados de consumo de recursos naturais disponíveis na base de dados Ecoinvent 3.6, obtendo-se assim as entradas do processo de produção dos telhados a serem utilizadas para cálculos no *software* openLCA 2.0®. Como saídas foram também atribuídos os valores de redução de poluentes apresentados na Tabela 2, estimando para 40 anos e atribuindo-se um valor negativo para que seja subtraído do somatório das emissões de poluentes totais.

Sendo assim, os processos de entradas e saídas foram adaptados dos materiais referenciados anteriormente para fluxos disponibilizados na base de dados utilizada. A partir disso, utilizou-se informações de fornecedores de âmbito global, nas seguintes categorias geográficas referenciadas pelo Ecoinvent 3.6: RoW (*Rest of the World*), GLO (Global) ou Brasil (BR). Então, as informações dadas como entradas e saídas para o processo de produção do telhado convencional estão representadas na Tabela 4, e para o telhado verde na Tabela 5.

Realizou-se os cálculos dos impactos ambientais em função de uma unidade de área de telhado. Para determinação e cálculo computacional de categorias de impactos ambientais utilizou-se o método CML 2001. Desse método foram selecionadas para estudo as categorias de potencial de aquecimento global em 100 anos (GWP100a), toxicidade humana e depleção abiótica de combustíveis fósseis.

Tabela 4: Entradas e saídas do processo de produção do telhado convencional

Componente de referência	Tipo de processo	Peso (kg/m²)	Fluxos Ecoinvent (*Flows*)	Fonte (*Provider*)
Tijolo	Entrada	38,48	*Clay, brick*	*clay brick production, Cutoff, U – RoW*
Vergalhão	Entrada	13,50	*Metal working, average for steel product manufacturing*	*metal working, average for steel product manufacturing, Cutoff, U – RoW*
Concreto	Entrada	486,50	*Concrete, 30Mpa*	*concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70%, Cutoff, U – BR*
Manta asfáltica	Entrada	12,00	*Mastic asphalt*	*mastic asphalt production, Cutoff, U – RoW*
Placas de espuma	Entrada	1,15	*Polyurethane, rigid foam*	*polyurethane production, rigid foam, Cutoff, U – RoW*
Papel filtro	Entrada	1,00	*Textile, non-woven polypropylene*	*textile production, non woven polypropylene, Cutoff, U – RoW*
Seixo	Entrada	277,95	*Gravel, round*	*gravel and sand quarry operation, Cutoff, U - RoW*
Telhado convencional	Saída (Produto)			

Fonte: o autor.

Tabela 5: Entradas e saídas do processo de produção do telhado verde

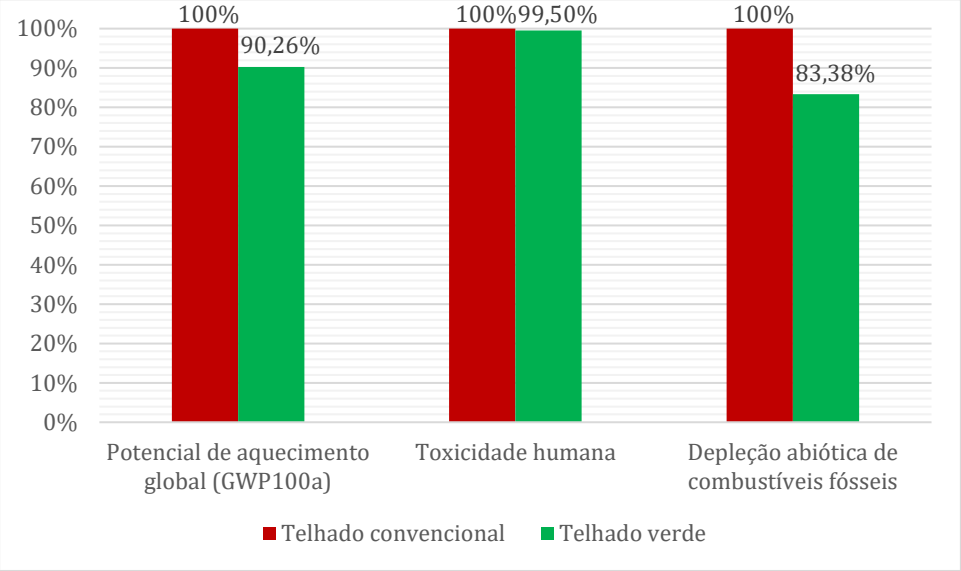
Componente de referência	Tipo de processo	Peso (kg/m²)	Fluxos Ecoinvent (Flows)	Fonte (*Provider*)
Polipropileno não tecido (TNT)	Entrada	0,18	*Textile, non-woven polypropylene*	*textile production, non woven polypropylene, Cutoff, U – RoW*
Polietileno de baixa densidade	Entrada	0,8	*Polyethylene, low density, granulate*	*polyethylene production, low density, granulate, Cutoff, U – RoW*
Poliestireno reciclado	Entrada	1,3	*Polystyrene scrap, post-consumer*	*collection of polystyrene scrap, post-consumer Cutoff, U – RoW*
Lã mineral reciclada	Entrada	1,2	*Waste mineral wool*	*treatment of waste mineral wool, sorting plant, Cutoff, U – RoW* *treatment of waste mineral wool, recycling, Cutoff, U – RoW*
Adubo	Entrada	15	*Manure,solid,cattle*	*manure, solid, cattle, Recycled Content cut-off, Cutoff, U – GLO*
Areia	Entrada	15	*Sand*	*sand quarry operation, extraction from river bed, Cutoff, U – BR*
Pedra-pomes	Entrada	70	*Pumice*	*pumice quarry operation, Cutoff, U – RoW*
Grama	Entrada	1	*Grass, organic*	*grass production, organic, intensive, Cutoff, U - RoW*
Tijolo	Entrada	38,48	*Clay, brick*	*clay brick production, Cutoff, U – RoW*
Vergalhão	Entrada	14,84	*Metal working, average for steel product manufacturing*	*metal working, average for steel product manufacturing, Cutoff, U – RoW*
Concreto	Entrada	486,5	*Concrete, 30Mpa*	*concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70%, Cutoff, U – BR*
NO_2	Saída	-0,0932	*Nitrogen dioxide*	
SO_2	Saída	-0,026	*Sulfur dioxide*	
O_3	Saída	-0,18	*Ozone*	
PM_{10}	Saída	0,0448	*Particulates, >2,5 um, and <10um*	
Telhado verde	Saída (Produto)			

Fonte: o autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4, os impactos do telhado convencional em porcentagem foram comparados com a porcentagem equivalente dos impactos associados ao telhado verde. As categorias de impactos representadas são o potencial de aquecimento global em 100 anos (GWP100a), toxicidade humana e de depleção abiótica de combustíveis fósseis.
Vale ressaltar que para contabilizar a função de remoção de poluentes atmosféricos ao longo do tempo por meio do telhado verde foi considerado um período de 40 anos de uso.

Figura 4: Impactos de GWP100a, toxicidade humana e depleção abiótica de combustíveis fósseis dos telhados de estudo



Fonte: o autor.

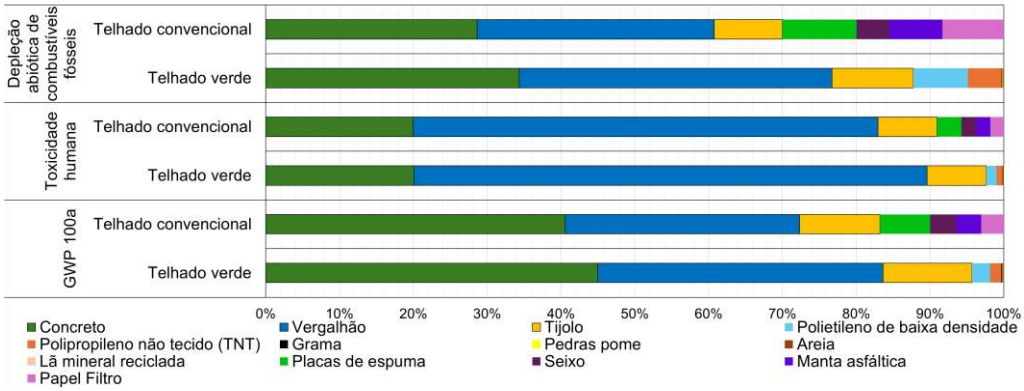
Como observado, o telhado verde possibilita a redução de impactos nas categorias avaliadas, com destaque para a depleção abiótica de combustíveis fósseis.
O telhado verde apresenta uma maior quantidade e complexidade de camadas de materiais, o que poderia resultar em maiores impactos que o do telhado convencional. Isso não foi o caso neste estudo, o que pode ser associado à escolha adequada dos materiais para o telhado verde, muitos dos quais foram previamente recomendados e avaliados por [8]
Deseja-se reduzir a emissão de gases do efeito estufa na construção civil, e pela quantificação executada na categoria de impacto GWP100a foi possível compreender que o telhado verde pode ser uma alternativa construtiva viável para reduzir essa emissão, a qual combinada à outras alternativas pode se ter uma maior amplitude de redução de impactos.
A redução no impacto de potencial de aquecimento global é oposta ao resultado obtido por[9]. Porém, no caso dos autores, além de um escopo diferente foram utilizados alguns outros materiais como componentes do telhado verde, tendo desconsiderado remoção de poluentes ao longo do tempo.

Os materiais poliméricos presentes nas camadas do telhado verde têm um grande potencial de poluição no seu processo de produção, porém nos resultados observados para o escopo estabelecido neste trabalho, o telhado verde ainda possuiu um impacto de toxicidade humana menor que o do telhado convencional. Então mesmo que a diferença tenha sido baixa entre a toxicidade humana nessa comparação (0,5%), ainda é um resultado positivo para a telhado verde nessa categoria.

A categoria de impacto da depleção abiótica de combustíveis fósseis foi mais notavelmente influenciada pela redução de emissões do telhado verde. Nessa análise, assim como na pesquisa dos autores [11], observou-se que o telhado verde é uma boa alternativa para a redução de impactos ambientais para longo prazo, mas que ainda se deve entender a gravidade dos impactos negativos dos processos de produção dos materiais nos períodos iniciais.

A escolha dos materiais ambientalmente adequados dos componentes das camadas é essencial para que se alcancem resultados positivos. Os principais materiais que acarretam os impactos calculados para as categorias de impacto avaliadas, dados em porcentagem do total de impactos resultante, são representados para o telhado verde e convencional na Figura 5.

Figura 5: Porcentagem de contribuição dos componentes dos telhados para os impactos das categorias de estudo



Grande parte dos impactos foram associados aos materiais da base de sustentação, o qual foi semelhante para os dois tipos de telhados. Portanto, deve-se buscar opções para redução desses impactos, como a utilização de concretos mais sustentáveis e redução de consumo de aço.

Quanto aos materiais específicos do telhado verde, o polietileno de baixa densidade utilizado na barreira contra raízes é o maior poluente, seguido pelo polipropileno, da camada de proteção e filtro. Para ter impactos ainda menores nesses materiais, pode-se verificar possíveis materiais para substituí-los ou avaliar se camadas que fazem parte são necessárias ao caso de aplicação.

Na pesquisa de [12] foram obtidos resultados para análise de ciclo de vida do telhado verde. Os resultados dos autores apontaram que os principais indicadores calculados para a análise ciclo de vida do telhado verde foram menores do que o de estruturas convencionais, semelhante ao ocorrido na análise das categorias de impacto na presente pesquisa.

Assim como na pesquisa de [8], compreendeu-se que sistemas de telhados mais simplificados e com menor uso de materiais artificiais são as opções mais adequadas ambientalmente. Baseando-se para a presente pesquisa em alguns materiais de camadas de telhados verdes analisados por esses autores, foi possível se realizar uma satisfatória análise comparativa com o telhado convencional.

CONCLUSÕES

Neste estudo, analisou-se o desempenho ambiental do telhado verde, considerando especificamente as categorias de impacto do potencial de aquecimento global de 100 anos, toxicidade humana e depleção abiótica de combustíveis fósseis.

Embora tenha sido observado que os telhados verdes apresentaram alguns impactos ambientais apenas ligeiramente inferiores aos telhados convencionais, dentro do escopo estabelecido, é importante ressaltar que, a longo prazo, os telhados verdes oferecem vantagens significativas para o meio ambiente.

Com isso, teve-se um resultado positivo para o telhado verde, visto que mesmo possuindo uma maior quantidade e complexidade de camadas de materiais, ainda não resultou em maiores impactos que o do telhado convencional. Desse modo, mesmo na fase de manufatura, o telhado verde já possibilita uma redução de impactos ambientais.

A partir da análise dos materiais mais poluentes, ressaltou-se que a escolha de materiais ambientalmente adequados dos componentes das camadas é essencial para que se reduzam os impactos ambientais.

Além de contribuir para a melhoria da qualidade do ar e da sensação térmica nos ambientes urbanos, o telhado verde pode auxiliar na redução do consumo de energia, especialmente na diminuição da necessidade de condicionadores de ar. Isso resulta em economia de custos a longo prazo e também reduz a pegada de carbono das edificações.

Como proposta para trabalhos posteriores, sugere-se a análise da eficiência energética do telhado verde, comparando a sua capacidade de isolamento térmico em relação à de um telhado convencional, associando-se às implicações aos impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo suporte financeiro dado à pesquisa (Termo de outorga de bolsa - Nº BOL2327/2023), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Ambiental (PPGECEA) e à Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS).

REFERÊNCIAS

[1] GAVRILIDIS, A. A.; POPA, A.; ONOSE, D. A.; GRADINARU, S. R. Planning small for winning big: Small urban green space distribution patterns in an expanding city. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 78, 2022.

[2] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi, 2022.

[3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Buildings 2022**. Paris: International Energy Agency, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/buildings. Acesso em: 22 de dezembro de 2023.

[4] RASUL, M. G.; ARUTLA, L. K. R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment. **Energy Reports**, v. 6, p. 503-508, 2020.

[5] PERI, G.; TRAVERSO, M.; FINKBEINER, M.; RIZZO, G. Embedding “substrate” in environmental assessment of green roofs life cycle: evidences from an application to the whole chain in a Mediterranean site. **Journal of Cleaner Production**, v. 35, p. 274-287, 2012.

[6] SHAFIQUE, M.; AZAM, A.; RAFIQ, M.; ATEEQ, M.; LUO, X. An overview of life cycle assessment of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, 119471, 2020.

[7] MORAU, D.; TSIORIMALALA, N. R.; RAKOTONDRAMIARANA, H. T. Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-income Country. **British Journal of Environment and Climate Change**, v. 7, p. 43-55, 2017.

[8] CHENANI, B. S.; LEHVÄVIRTA, S.; HÄKKINEN, T. Life cycle assessment of layers of green roofs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 153-162, 2015.

[9] EL BACHAWATI, M.; MANNEH, R.; BELARBI, R.; DANDRES, T.; NASSAB, C.; EL ZAKHEM, H. Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of traditional gravel ballasted, white reflective, and vegetative roofs: A Lebanese case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 833-842, 2016.

[10] YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 7266-7273, 2008.

[11] BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**, v. 48, p. 57-65, 2012.

[12] MIHALAKAKOU, G.; SOULIOTIS, M.; PAPADAKI, M.; MENOUNOU, P.; DIMOPOULOS, P.; KOLOKOTSA, D.; PARAVANTIS, J. A.; TSANGRASSOULIS; A.; PANARAS, G.; GIANNAKOPOULOS; E.; PAPAEFTHIMIOU, S. Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 180, 113306, 2023.