

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE TELHADO VERDE EM HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL BRASILEIRA

Life Cycle Assessment of green roof in brazilian social housing

Julia Santiago de Matos Monteiro Lira¹, Lucas Rosse Caldas²,
Thiago Oliveira Rodrigues³, Rosa Maria Sposto⁴



PALAVRAS CHAVE:

ACV;
Telhado verde;
Cobertura convencional;
Fase de uso;
Edificações;

KEYWORDS:

LCA;
Green roof;
Conventional roof;
Use stage;
Building.

RESUMO: O telhado verde é uma alternativa antiga para reduzir os efeitos das ilhas de calor e do aquecimento global, proporcionando benefícios de conforto térmico em edificações. No entanto, aspectos relacionados ao seu desempenho ambiental ainda são pouco estudados. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de berço ao túmulo de um telhado verde (TV) em comparação com um telhado convencional (TC) para uma habitação de interesse social em Brasília. A metodologia utilizada para a ACV foi feita no software GaBi 6. Na fase de uso, o consumo elétrico para utilização de condicionamento artificial foi quantificado pelo software *DesignBuilder*, para a zona bioclimática 4. O valor resultante foi inserido no GaBi juntamente com os outros dados para o cálculo das categorias de impacto. A fase de uso foi a que apresentou maior valor de impacto ambiental nas categorias avaliadas. O TV foi favorável na maioria das categorias. O uso de telhas cerâmicas foi o maior responsável pelos impactos ambientais do TC. Em toda a ACV de berço ao túmulo, a substituição de uma cobertura convencional por uma cobertura em telhado verde se mostrou favorável, contribuindo para menores impactos ambientais, especialmente considerando o impacto de utilização em um conjunto habitacional, promovendo a alteração de microclima.

ABSTRACT: The green roof is an old alternative to reduce the effects of heat islands and global warming, providing thermal comfort benefits in buildings. However, aspects related to its environmental performance are still little studied. In this context, the objective of this study was to perform a cradle-to-grave Life Cycle Assessment (LCA) of a Green Roof (GR) compared to a Conventional Roof (CR) for a social interest housing in Brasília. The methodology used for the LCA was done in the software GaBi 6. In the use phase, the electric consumption for the use of artificial conditioning was quantified by the software *DesignBuilder*, for bioclimatic zone 4. The resulting value was entered into GaBi along with the other data to calculate the impact categories. The use phase had the highest environmental impact value in the categories evaluated. GR was favorable in most categories. The use of ceramic tiles was most responsible for the environmental impacts of the CR. Throughout the cradle-to-grave LCA, the replacement of a conventional roof by a green roof proved to be favorable, contributing to lower environmental impacts, especially considering the impact of use in a housing development, promoting microclimate alteration.

* Contato com o autor:

¹ e-mail: juliasanttiago@gmail.com (J. S. M. M. Lira)

Mestra em Engenharia Civil, Instituto Federal do Piauí (IFPI)

² e-mail: lrc.ambiental@gmail.com (L. R. Caldas)

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

³ e-mail: thiagorodrigues@ibict.br (T. O. Rodrigues)

Doutor em Engenharia Florestal, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), Brasília, DF

⁴ e-mail: rmsposto@unb.br (R. M. Sposto)

Doutora em Engenharia Civil, Universidade de Brasília (UnB)

Publicado em 16 de setembro de 2024

1. INTRODUÇÃO

A busca por edificações com longa vida útil e aumento do uso de eletroeletrônicos aumentou ainda mais o peso da fase operacional no desempenho global do edifício, principalmente nos países desenvolvidos e nos países em fase de desenvolvimento como o Brasil. Para minimizar este impacto, foram desenvolvidas tecnologias mais energeticamente eficientes e ainda o conceito de edifícios zero energia (*Net Zero Energy Building*). Portanto, nos países desenvolvidos, os percentuais de energia e CO₂ se tornaram mais expressivos na fase de pré-uso, que envolve a produção, o transporte de materiais e a etapa de construção (Silva e Silva, 2015).

Para Coma et al. (2016), a indústria da construção civil é um agente eficaz para alcançar a redução do consumo energético e de emissões de CO₂, objetivando a produção de edifícios mais sustentáveis com maior eficiência energética. Os edifícios com baixo teor de carbono tem sido considerados como uma estratégia importante para alcançar a conservação de energia e a redução das emissões de gases de efeito estufa - GEE (Gan et al., 2017). Algumas tecnologias consideradas verdes têm sido empregadas para auxiliar a mitigação dos problemas de consumo energético elevado nas edificações, além da função estética e de retenção de águas da chuva (Koura et al., 2020).

Um telhado denominado verde difere de um convencional por possuir um substrato com vegetação (Peri et al., 2012). É geralmente construído para melhorar o conforto térmico de um edifício, mas existem muitos outros benefícios que ele pode proporcionar, tais como: aumento da retenção de água, contribuindo para reaproveitamento e drenagem das águas pluviais; redução da ilha de calor urbana; redução da concentração de CO₂; absorção acústica; melhoramento estético das cidades; aumento da biodiversidade e redução da perda de habitat.

O objetivo desta pesquisa é executar uma ACV de berço ao túmulo de um telhado verde em comparação com um telhado convencional brasileiro constituído por laje de concreto armado e telhas cerâmicas para um projeto de habitação de interesse social.

A proposta é para que o telhado verde seja incluído em habitações de interesse social ao invés da cobertura tradicional comumente utilizada no Brasil. Esta aplicação, em um conjunto habitacional com centenas de casas dá um caráter multiplicador à proposta de intervenção, provocando uma alteração no microclima local, além de favorecer a drenagem urbana. Neste artigo, todas as fases do ciclo de vida foram incluídas na análise e relacionadas com o desempenho térmico das coberturas. Além disso, a fase de uso foi incluída juntamente com as outras fases da ACV no software *GaBi* e isso resultou na análise global das fases do ciclo de vida. A abordagem dos resultados em separação das categorias de impacto é também um diferencial, cuja intenção é mostrar para o leitor uma discussão mais aprofundada sobre elas dentro de cada fase do ciclo de vida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pesquisadores têm buscado embasar o benefício ambiental de telhados verdes desenvolvendo uma ACV. Blackhurst et al. (2010) analisaram um telhado verde extensivo, em escala do meio urbano, com vida útil de 30 anos sem especificar nenhuma informação sobre as camadas constituintes, nos EUA. A metodologia de avaliação foi a análise econômica *input-output* para três categorias de impacto: uso de energia, emissões de GEE e escoamento de águas pluviais. As fases de ACV avaliadas foram: produção, construção e uso. Os

resultados sugeriram que telhados verdes são estratégias rentáveis para gerenciamento de águas pluviais e redução de gases de efeito estufa.

Contarini e Meijer (2015) compararam vários tipos de cobertura com uma vida útil de 30 anos. As fases analisadas foram: produção, uso e manutenção. Foi usada a base de dados *Ecoinvent*. A avaliação do impacto foi através do método *ReCiPe (endpoint)* e o consumo de energia pelo método *Dutch*. Os autores concluíram que os sistemas de cobertura com um revestimento reflexivo e telhados verdes têm os mais altos valores nas categorias de impacto, mas eles também têm um efeito positivo sobre a carga de refrigeração do edifício, melhoram a vida útil da membrana impermeável e reduzem o efeito de ilha de calor. Pela quantidade de materiais necessários para sua instalação, o telhado verde possui maiores danos na categoria “consumo de recursos”.

Koura et al. (2020) incluíram todas as fases do ciclo de vida, considerando a ACV de berço ao túmulo de um telhado verde em comparação a um convencional no Líbano. A fase de uso considerou uma medição *in loco* de temperatura para estimar posteriormente o consumo de energia. Para a fase de fim de vida, os autores analisaram dois cenários: aterro e reciclagem. Os resultados foram favoráveis ao telhado verde analisado considerando a escassez de água e a redução do consumo de energia, mas a estimativa pode carregar incertezas nos dados.

Apesar de alguns destes benefícios estarem embasados na literatura científica, o real potencial do telhado verde em relação à sustentabilidade ambiental, considerando todo o seu ciclo de vida, deve ser mensurado, dada a importância dos impactos decorrentes do uso dos recursos naturais (materiais, energia e água) e das emissões geradas nas várias fases do ciclo de vida, incluindo o pós-uso.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, procedeu-se ao cumprimento de algumas etapas necessárias ao estudo. Tais etapas foram elaboradas de acordo com os conceitos e metodologias da ferramenta de ACV:

- Etapa 1: definição dos objetivos e escopo (incluindo sistema do produto, unidade funcional e fronteiras do sistema);
- Etapa 2: construção e análise do inventário (incluindo coleta de dados e quantificação de entradas e saídas);
- Etapa 3: avaliação dos impactos ambientais (escolha do método de avaliação de impacto e categorias de impacto analisadas);
- Etapa 4: interpretação (análise em conjunto do inventário e da avaliação de impacto).

3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO DA ACV

Considerou-se que a habitação está situada em Brasília (DF) e tem vida útil igual a 50 anos, conforme recomendado pela ABNT NBR 15575: 2013. A habitação possui um modelo típico construído em conjuntos habitacionais brasileiros e tem cinco cômodos dispostos em uma área de 45 m²: dois quartos, sala, cozinha e banheiro. A área de cobertura totaliza 50 m². A unidade funcional escolhida foi de 1 (um) m² de cobertura com vida útil de 50 anos, comum a todos os sistemas construtivos analisados e com espessura variável, de acordo com o tipo de cobertura. Portanto, todos os resultados das categorias de impacto foram apresentados em valores para unidade funcional.

Foi avaliado o telhado de uma habitação com sistema convencional, constituído por laje de concreto armado e estrutura em armação de pontaltes e trama de terças, caibros e ripas de madeira com

sombreamento com telha cerâmica, conforme apresentado na Figura 1. A laje é uma laje de forro maciça com espessura de 10 cm.

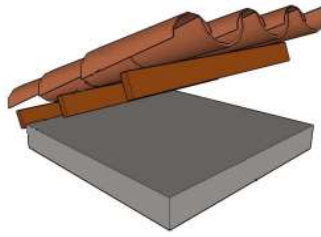


FIGURA 1: Detalhe do telhado convencional (TC).

FONTE: Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas LabEEE - UFSC (2011).

Na literatura científica, observa-se que o alto consumo energético e as emissões de gases poluentes provocados pelo cimento e o aço já são conhecidos. Dessa forma, a escolha da madeira no suporte estrutural foi em busca de estratégias mais ambientalmente favoráveis (Saade, Guest e Amor, 2020), já que o telhado verde é um sistema construtivo que pode permitir variações e aplicação sobre diversas superfícies e estruturas. A estrutura de madeira é composta por vigas em madeira maciça (Angelim Pedra com dimensões de 7x15 cm) com fechamento em compensado estrutural do tipo *Oriented Strand Board (OSB)* para servir de base para o telhado verde extensivo. A geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) foi usada para impermeabilização e, sobre ela, foram dispostos módulos alveolares leves.

O telhado verde modular foi escolhido devido a sua facilidade na montagem e na manutenção, além da redução do peso total. É composto por módulos plásticos que abrigam o substrato e a vegetação juntamente com a água drenada por esse sistema. O corte esquemático está representado na Figura 2.

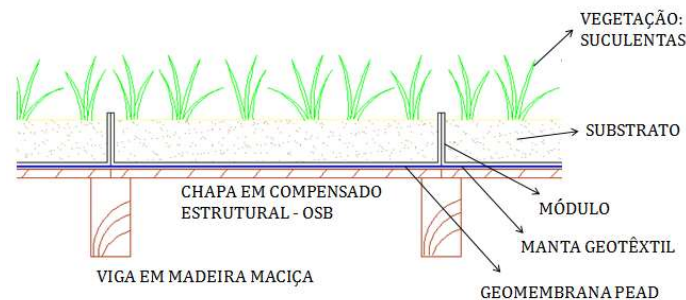


FIGURA 2: Sistema de telhado verde modular (TV) utilizado na pesquisa.

FONTE: Autoria própria.

O sistema foi dimensionado para suportar o peso saturado do módulo (80 kg/m^2). O suporte estrutural possui inclinação de 2%. Nas extremidades da inclinação da cobertura, possui um sistema simples de tubo coletor, para, no caso de haver excesso de chuva, a água ser direcionada para o tubo de queda. Como é o mesmo sistema de coleta de água pluvial sem diferenças significativas, este foi desconsiderado na comparação.

Nem todas as fases de uma ACV de uma edificação ou sistema construtivo, apresentadas na EN 15804: 2012 foram consideradas neste estudo. O transporte, por exemplo, foi apenas considerado na fase de processo construtivo (distância da fábrica para o local da obra). Na fase de manutenção, a reabilitação foi desconsiderada. Na fase de fim de vida, apenas o transporte para aterro foi considerado. A fase além dos limites do sistema não foi abordada. A fronteira da ACV, em relação às suas fases, está apresentada na Tabela 1, juntamente com a nomenclatura definida na EN 15804: 2012.

Para melhor execução e interpretação da ACV, todas as fases do ciclo de vida consideradas no estudo, foram estratificadas e denominadas (Tabela 1).

Para a fase de pré-uso, a etapa de produção foi incluída no *GaBi* por meio de planilhas com o fluxo encontrado no banco de dados do programa, sendo, quando necessário, adaptado à realidade brasileira.

TABELA 1: Detalhamento e nomenclatura das fases da ACV.		
Fase	Detalhamento	Sigla
Pré-uso	Extração e processamento de matérias-primas	A3
	Transporte do ponto fabril ao local da obra	A4
	Execução, considerando o consumo energético e os resíduos gerados	A5
Uso	Consumo energético de condicionamento artificial na etapa operacional	B6
	Reposição	B4
Pós-uso	Disposição em aterro dos resíduos gerados pela demolição e/ou desconstrução dos sistemas	C2

FONTE: Autoria própria.

Para a etapa de transporte, foi considerado o uso de caminhão *Truck*, abastecido com diesel, para transportar: os materiais do ponto da fábrica até o local da obra na execução dos sistemas; os resíduos gerados na execução para o aterro; os materiais do ponto de fábrica até o local da obra na manutenção e os resíduos da demolição/desconstrução até o aterro na destinação final. As distâncias de transporte foram consideradas como sendo a distância entre o ponto de fábrica (ou ponto de venda) até o local da obra, estipulado como sendo a Universidade de Brasília (SG -12) de acordo com uma média encontrada no mapa.

No *software GaBi*, as entradas do caminhão *Truck* são: diesel e carga; as saídas: emissões de cargas e combustão (amônia, benzeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, monóxido de nitrogênio, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, COV, partículas PM_{2,5}, dióxido de enxofre).

A etapa de execução (A5) não foi considerada para o sistema de TV pois não há necessidade de consumo elétrico para instalação/montagem. Diferentemente do sistema convencional que o valor calculado foi incluído no fluxograma de eletricidade já adaptado ao Brasil.

Para a etapa de reposição (B4), foi utilizado um Fator de Reposição (FR) referente a quantidade de vezes que o material deverá sofrer substituição. Assim sendo, no telhado verde o substrato possui FR de 9,8 de acordo com (Lamnatou e Chemisana, 2014) e na cobertura convencional apenas as telhas são substituídas com um FR de 2,5 (Bengoa, 2011).

Neste estudo, a contribuição da fase de uso está relacionada exclusivamente com a utilização de energia elétrica para o funcionamento dos aparelhos de condicionamento artificial. Obviamente, existem outras formas de utilizar energia elétrica em edificações, como equipamentos eletrônicos, porém, o objetivo é relacionar o impacto ambiental dos sistemas de cobertura com seu desempenho térmico. Além disso, é o único ponto de distinção entre eles, já que a quantificação de consumo de equipamentos para cocção, por exemplo, independe das características térmicas dos sistemas de vedação.

O sistema de resfriamento de ambientes determinado foi o tipo “*Split no fresh air*”, utilizando o perfil “*Apartamento Cooling*”, com eficiência de aparelho de valor mínimo de eficiência para aparelhos com Selo Procel C (eficiência média), de eficiência igual a CoP = 2,8. Foi adotado o selo Procel nível C (mínimo) pelo fato da EHU estudada ser de baixo padrão, e normalmente os usuários deste tipo de edificação optarem por aparelhos de menor custo e provavelmente de menor eficiência. A simulação contou com apenas um

aparelho de condicionamento na sala de estar, já que este cenário apresentou maior diferença entre os apresentados por Caldas (2016).

A agenda de uso do aparelho de ar-condicionado foi considerada "cheia", ou seja, a qualquer momento do dia o equipamento pode ser acionado em função apenas da temperatura de conforto. Isso significa que quando a temperatura ambiente atingir temperaturas iguais ou superiores a 24°C, o equipamento de condicionamento será ligado (Caldas, 2016). Estas considerações se adequam a cidade de Brasília (zona bioclimática 4).

Para o cálculo do consumo energético na etapa operacional da habitação nos cenários avaliados, utilizou-se o software *DesignBuilder*, do *Energy Plus*, que é o recomendado pela norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575: 2013. A simulação foi feita com base no projeto de uma habitação constituída por vedação vertical de blocos cerâmicos (convencional) e cobertura TV e TC. As características térmicas foram consideradas conforme os conceitos presentes na ABNT NBR 15220: 2003. Transmitância térmica (U) medida em $W/(m^2.K)$ e Capacidade térmica (Ct) medida em $J/(m^2.K)$. Os valores desses dois parâmetros estão apresentados na Tabela 2, para cada sistema considerado.

TABELA 2: Valores de transmitância e capacidade térmica.		
	TV	TC
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	0,83	2,05
Capacidade Térmica (Ct) ($kJ/m^2.K$)	233,77	238,00

FONTE: Autoria própria.

O consumo de energia elétrica na fase de uso (valor em kWh) foi calculado como sendo o total de energia por ano de toda a habitação de consumo para condicionar artificialmente o ambiente, de acordo com a resistência térmica e características térmicas de cada cobertura e em toda a sua vida útil. Para a real influência do consumo energético nas categorias de impacto, o valor gerado no *software DesignBuilder* foi incluído no GaBi durante a etapa operacional, para haver a correta tradução para os valores das categorias de impacto. A energia elétrica escolhida no GaBi corresponde a dados da matriz energética brasileira, adaptada na base do próprio *software*.

3.2 CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO INVENTÁRIO

As perdas foram incluídas, conforme descrito a seguir. Para os materiais com dimensões modulares, como OSB, Vigas de madeira (TV), manta de PEAD (para impermeabilização das chapas OSB) e manta geotêxtil para camada filtrante, o cálculo das perdas foi feito pela disposição manual de cada peça na cobertura. Para o módulo plástico não houve perda. Para o substrato, a perda foi considerada a mesma da cal pela forma de aquisição para instalação (na concepção de Agopyan, 1998).

No sistema convencional, a perda do concreto foi baseada em uma média calculada por Agopyan (1998), para concreto usinado. As perdas do aço, da estrutura de madeira e das telhas cerâmicas foram segundo Pedroso (2015). As perdas já estão embutidas na quantidade apresentada de cada material (Tabela 3).

TABELA 3: Materiais e componentes dos sistemas TV e TC por unidade funcional (m² de cobertura).

	MATERIAIS E COMPONENTES	QUANTIDADE	PERDAS	TRANSPORTE (km)
TV	OSB	0,022 m ³	17%	28
	VIGAS DE ANGELIM PEDRA	0,02 m ³	6%	19
	MANTA PEAD	5,25 kg	5%	1399
	MÓDULO PLÁSTICO (PEAD)	5,80 kg	0%	2131
	MANTA GEOTÊXTIL	0,20 kg	18%	758
	SUBSTRATO	60,00 kg	12%	11
	VEGETAÇÃO CACTO MARGARIDA	1,00 m ²	-	-
TC	CONCRETO	0,10 m ³	9%	14
	AÇO	3,5 kg	10%	18
	ESTRUTURA E TRAMA DE MADEIRA	0,04 m ³	15%	19
	TELHAS	86,20 kg	15%	25

FONTE: Autoria própria.

Calculado, então, o quantitativo dos materiais que compõem cada sistema de cobertura, estes foram inseridos no *software GaBi*. Como entendimento da leitura do *software*, cada material foi inserido dentro da etapa de ACV correspondente e, por isso, é denominado um dado de entrada. Cada dado de entrada é reconhecido pelo *GaBi* como sendo um fluxo de processos elementares de entrada. Os fluxos de saída são os produtos da etapa de ACV em questão, sejam eles resíduos e/ou o produto acabado. O fluxograma simplificado está apresentado na Figura 3 e é necessário para ilustrar a leitura do *GaBi*. Observa-se que o telhado verde é um fluxo de saída, que é o produto acabado citado como exemplo. O produto acabado é fluxo de saída em uma etapa de ACV, mas é fluxo de entrada da etapa seguinte.

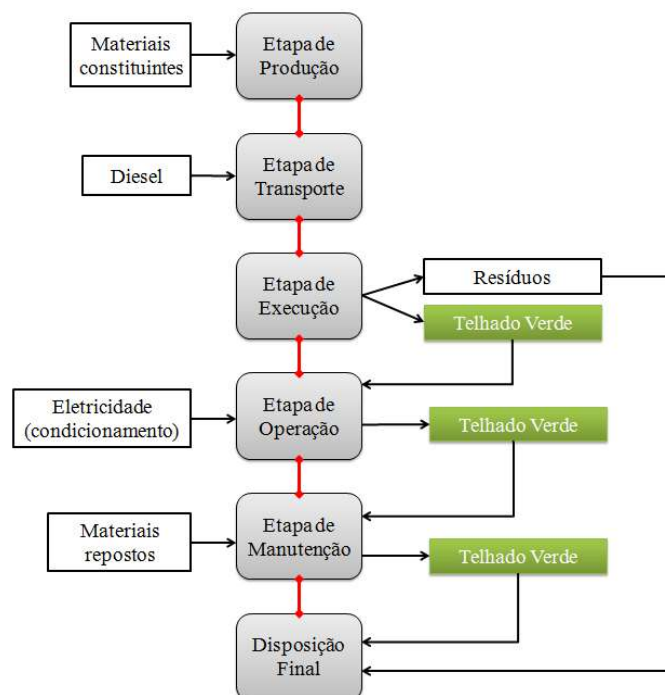


FIGURA 3: Fluxograma ilustrando a leitura do software *GaBi* na ACV do TV.

FONTE: Autoria própria.

3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO

A escolha, dentro do *GaBi*, foi pelo método de avaliação de impacto CML 2001, que restringe a modelagem quantitativa aos estágios iniciais da cadeia causa-efeito para limitar as incertezas. Os resultados são agrupados em categorias *midpoint* de acordo com mecanismos comuns (por exemplo, alterações climáticas) ou agrupamentos comumente aceitos (por exemplo, ecotoxicidade).

3.4 INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Na fase de interpretação, foi feita uma verificação se o objetivo e o escopo definidos foram de fato atingidos. Além disso, elaboraram-se conclusões consistentes, confirmando as limitações e variáveis admitidas e fornecendo também recomendações.

Não obstante, nessa etapa houve a detecção dos pontos críticos. Ou seja, quais etapas foram responsáveis por maiores valores em determinada categoria ambiental e qual material (ou componente) foi o maior contribuinte dentro da mesma etapa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O consumo energético calculado no *DesignBuilder* foi de 489,79 kWh/ano para a habitação com TV e de 900,37 kWh/ano para a habitação com TC. Considerando que 1 kWh é equivalente a 3,6 MJ, encontrado por uma média dos últimos anos do Balanço Energético Nacional, foi feita a conversão dos resultados, já que o valor de entrada de energia no *software GaBi* é em MJ. O TV consumiu 1760 MJ/m² em 50 anos de vida útil da habitação e o TC, 3240 MJ/m².

Observou-se uma redução de 45,6% substituindo o TC por TV na mesma habitação e na mesma localização. O motivo dessa diferença está na Resistência Térmica (Rt) de cada cobertura, relacionada com a transmitância térmica. Isto porque a Capacidade térmica não apresentou diferença significativa entre os dois sistemas. Isso demonstra que o TV possui maior resistência térmica à passagem de calor, proporcionando maior desempenho térmico dentro da habitação.

Para melhor discussão dos resultados da ACV, estes foram apresentados separados por categoria de impacto da ACV: depleção abiótica (de recursos e de combustíveis fósseis), potencial de acidificação, potencial de eutrofização, ecotoxicidade (água doce, água marinha e terrestre), potencial de aquecimento global, toxicidade humana, depleção da camada de ozônio e criação de ozônio fotoquímico.

4.1 DEPLEÇÃO ABIÓTICA

No TV, observa-se a contribuição maciça da etapa de produção, especialmente referente aos materiais: OSB e manta geotêxtil (feita de poliéster). O TC apresentou um dado singular (Figura 4). O valor da depleção abiótica (recursos) da etapa de produção foi um valor negativo, atribuído ao aço utilizado na laje. Para Yellishetty et al. (2011), os impactos ambientais da mineração e processamento de recursos minerais são o principal problema desta categoria. Isto porque, segundo os próprios autores, a indústria siderúrgica produz numerosas ligas (ou tipos de aço), que, por sua vez, exigem recursos minerais e metálicos abrangentes. Portanto, esse material foi o de maior contribuição (em módulo), ultrapassando o esgotamento das reservas disponíveis de minérios (valor negativo de Sb_{-eq}).

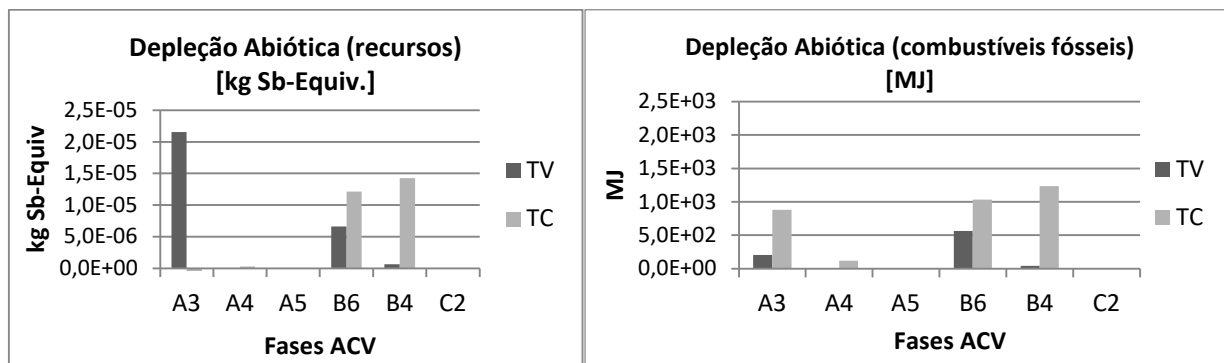


FIGURA 4: Resultado da depleção abiótica.

FONTE: Autoria própria.

A etapa de manutenção foi a que teve maior valor de depleção abiótica (recursos e combustíveis fósseis) no TC, seguida bem próxima pela etapa operacional. Isso ocorreu pela maior contribuição da telha cerâmica (reposta 2,5 vezes durante a vida útil da habitação) (B4) e consumo de eletricidade (B6). Portanto, a preocupação com componentes de sistemas construtivos adequados ao clima regional se torna uma grande aliada com a redução de impactos gerados.

Na categoria de depleção abiótica (combustíveis fósseis), a etapa de produção (A3) do TV respondeu por cerca de 25% do total, por causa do uso de madeira (vigas e OSB) e da manta geotêxtil (constituída de poliéster). A etapa de manutenção (B4) representou menos de 5% do total (TV), mas esse valor foi quase exclusivamente pelo uso de brita na reposição do substrato.

No TC, a etapa de manutenção (B4) foi a maior responsável no total de depleção abiótica (combustíveis fósseis), seguida logo depois pela etapa operacional. Essa contribuição da manutenção é pela reposição da telha cerâmica. A etapa de produção também teve alta representatividade, especialmente pela utilização de madeira.

O material que liderou o resultado de depleção abiótica foi a telha cerâmica, especialmente pela sua fabricação, proveniente da queima de combustíveis fósseis. Um dado interessante nesta categoria é a elevada contribuição de diesel na etapa de transportes (A4) para o TC. A diferença, para o TV, é a grande quantidade (em massa) de materiais e componentes sendo transportados na etapa de produção do TC. A diferença do resultado em antimônio equivalente e do resultado fóssil está na fase de produção.

4.2 POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO

O resultado para o potencial de acidificação (Figura 5) é realmente significativo para a etapa de operação, pois este representa 95% do valor total para o TV e 79% para o TC. A contribuição restante está concentrada na fase de produção (9%) e na fase de manutenção (10%), especialmente por conta da telha cerâmica (acrescenta-se ainda, na fase de produção, a madeira para suporte estrutural que possui igual contribuição).

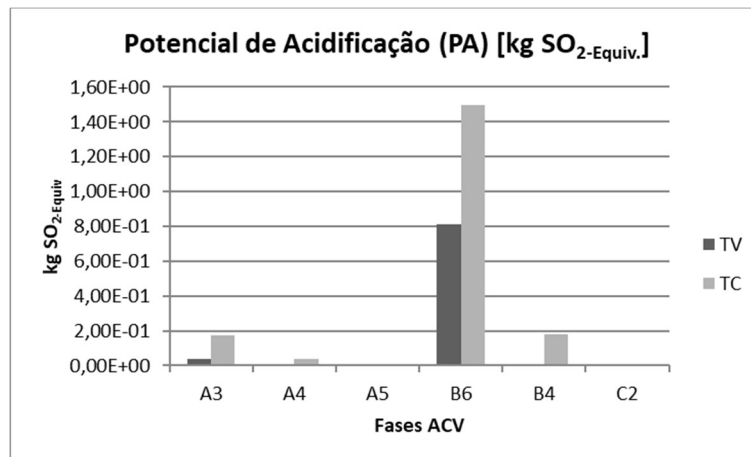


FIGURA 5: Resultado do potencial de acidificação.
FONTE: Autoria própria.

A matéria orgânica das matérias-primas cerâmica pode interagir com o oxigênio da atmosfera do forno e gases dos combustíveis, contribuindo para as liberações de gases poluentes, incluindo o dióxido de enxofre (SO₂), o que pode justificar o resultado apresentado (Souza et al., 2008). A queima de combustíveis fósseis também é responsável pela emissão de SO₂ na atmosfera, o que corresponde ao resultado apresentado no gráfico em relação à etapa de operação.

4.3 POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO

As principais fontes do Potencial de Eutrofização são a lixiviação de nitrato (NO₃⁻) e fosfato (PO₄³⁻) para a água e as emissões de NH₃ (amônia) para a atmosfera. A categoria de impacto é quantificada em termos de fosfato equivalente, ou seja, 1 quilo de NO₃⁻ e NH₃ são equivalentes a 0,44 e 0,43 kg fosfato, respectivamente.

Em ambos os casos de cobertura, a etapa operacional (B6) apresentou maiores valores em termos de potencial de eutrofização. No TC, observam-se valores próximos nas etapas de produção e manutenção, na etapa de produção sendo responsáveis a telha cerâmica e a madeira utilizada em seu suporte estrutural. Na etapa de manutenção a telha cerâmica foi a responsável principal pelo resultado. A amônia é um dos gases liberados pela queima nos fornos para produção da cerâmica (SOUZA et al., 2008). No TV, a utilização da madeira para suporte estrutural (vigas e OSB) foi a responsável pelo resultado na etapa de produção. Mesmo assim, os maiores valores no Potencial de Eutrofização foram na ordem de grandeza 10⁻², optando por não apresentar graficamente esta categoria.

4.4 ECOTOXICIDADE

Esta categoria de impacto (Figura 6) está relacionada com os impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos marinhos, aquáticos de água doce e terrestres. A unidade de medida da ecotoxicidade é o 1,4-diclorobenzeno-equivalente (1,4DCB-eq), muito presente na aplicação de pesticidas e naftalina e produção de plásticos.

Cada categoria de impacto em uma ACV possui diferente unidade de medida, mas é importante destacar que a ecotoxicidade marinha teve a maior contribuição tanto no TC, quanto no TV. Especialmente a fase de manutenção do TC, correspondente à telha cerâmica (que também é fator de maior impacto na fase de produção). Madeira, aço e cimento vêm na sequência de impacto na fase de produção para a ecotoxicidade marinha. A fase do TV que segue a fase de uso é a de produção (A3), com a contribuição mais

significativa das madeiras. Depois, é a fase de manutenção (B4) com a contribuição do seixo. Apesar disso, a contribuição do TC é mais de 20 vezes maior na soma de todas as ecotoxidades que o TV. Os resultados para esta categoria de impacto estão relacionados à queima de combustível fóssil ocorrida nos fornos (Agyekum et al., 2017).

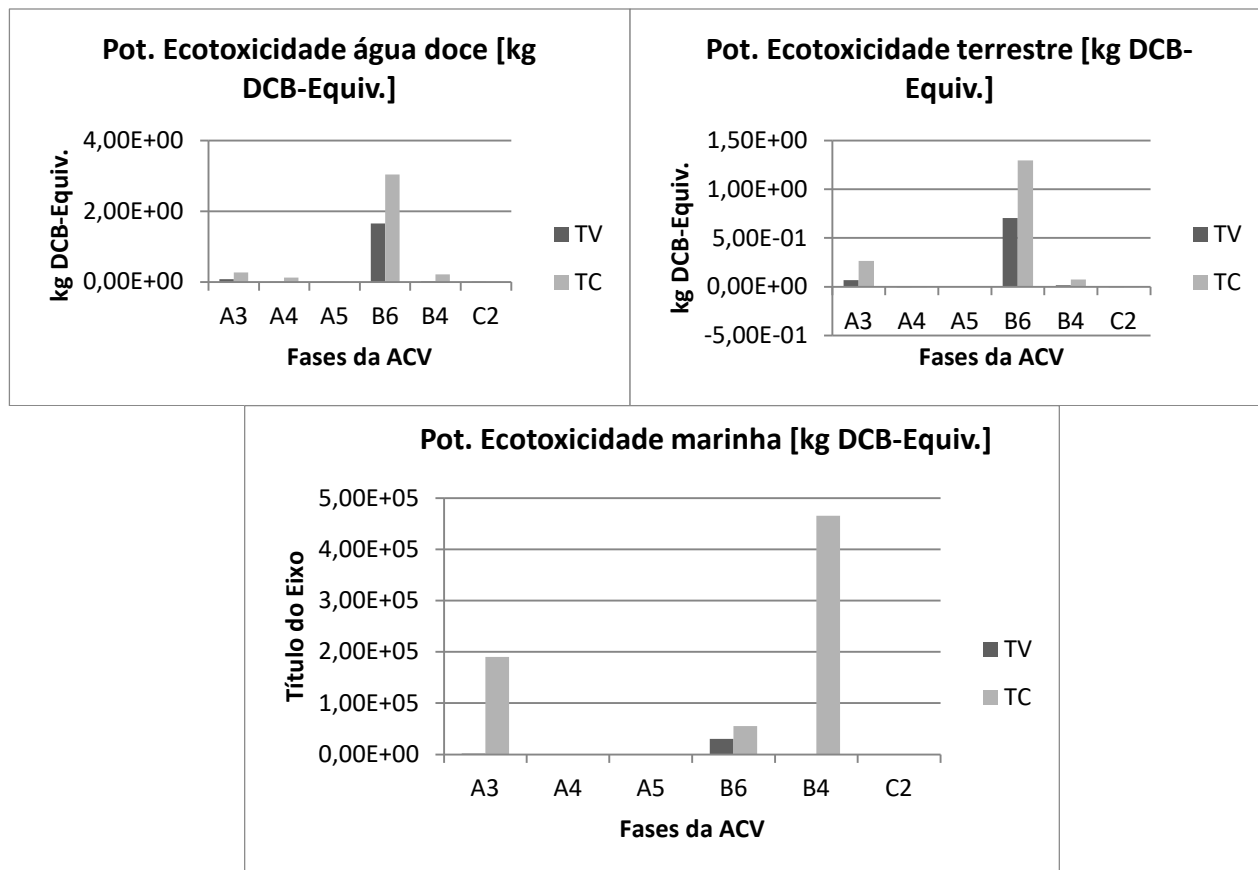


FIGURA 6: Resultado do potencial de ecotoxicidade (água doce, terrestre e marinha).
 FONTE: Autoria própria.

4.5 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

No TV, o potencial de aquecimento global (Figura 7) se concentrou na etapa operacional (95% aproximadamente), seguido da etapa de produção (A3) (quase 4%). O dado de entrada com maior contribuição nas emissões de CO_{2-eq} foi o uso de eletricidade, na etapa operacional (B6). O segundo foi a brita, na etapa de manutenção (B4).

Um ponto a ser discutido é que OSB e as vigas de madeira tiveram maiores contribuição em módulo, pois apresentaram valores negativos para o potencial de aquecimento global. O que ocorre é que ambos os materiais provêm de plantas, que, enquanto vivas, absorveram o CO₂ no processo de fotossíntese e posteriormente o liberaram no processo de respiração, compensando o CO₂ gasto. É certo que a extração da matéria-prima para o processamento desses materiais deve acontecer em florestas plantadas. O resultado difere, por isso, no gráfico onde o carbono biogênico é excluído, considerando a contribuição após o corte da madeira na floresta.

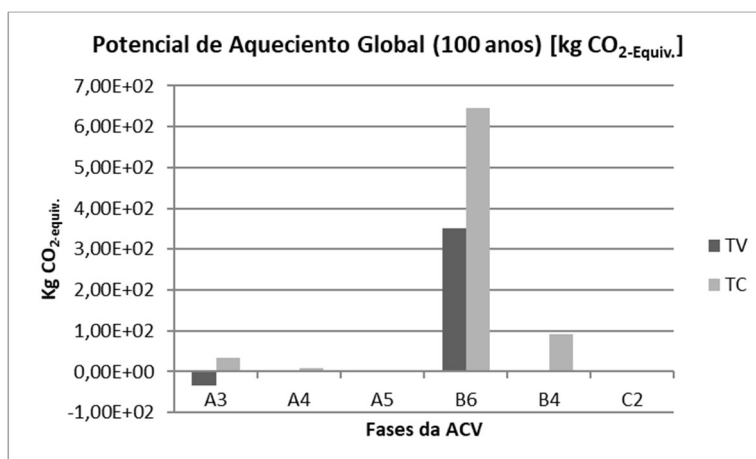


FIGURA 7: Resultado do potencial de aquecimento global.

FONTE: Autoria própria.

No TC, a etapa operacional (B6) foi a maior representante da categoria (com quase 80%), seguida da etapa de produção (A3) e manutenção (B4) (aproximadamente 10%, cada). A telha cerâmica, tanto na B4, como na A3, foi o material com maior valor de contribuição. Isto porque a quantidade utilizada na manutenção é 2,5 vezes a utilizada na produção, pela vida útil do material e sua necessidade de reposição. A telha cerâmica assumiu sozinha a contribuição da B4 no potencial total, até mesmo por ser o único material com necessidade de ser substituído. A telha cerâmica da produção contribuiu com igual valor do cimento na etapa de produção. Observou-se que, em todas as categorias anteriormente citadas, apenas no potencial de aquecimento global o cimento surgiu, porém, de forma bem significativa.

Na etapa de produção, o TC superou as emissões do TV em seis vezes mais. Isso mostra a favorável escolha da estrutura de vigas e fechamento em madeira em detrimento de uma cobertura convencional, de laje de concreto armado e utilização de telha cerâmica. Porém, vale ressaltar que esse favorecimento ocorreu nesta categoria. O TC foi superior ao TV em todas as etapas, não apenas na produção, o que conduz a enfatizar a importância do desempenho térmico nas emissões de GEE.

Comparando o resultado deste estudo com os demais encontrados na literatura, tem-se que Kosareo e Ries (2007) concluíram que o TV extensivo correspondeu a cerca 60% do telhado referência, enquanto neste estudo foi de, aproximadamente, 45%. Peri et al. (2012) contabilizaram 79,6 kg CO₂-eq e atribuíram às emissões de dióxido de carbono e metano. O Telhado Verde de Cubi et al. (2016) totalizou 34 mil kg CO₂-eq, enquanto o de El Bachawati et al. (2016), 98 mil kg CO₂-eq.

4.6 TOXICIDADE HUMANA

Na toxicidade humana (Figura 8), o TV já tem uma maior expressividade no gráfico, ainda assim representa apenas 25% do total apresentado pelo TC em todo o ciclo de vida. A concentração no TV está na fase de operação, pelo elevado valor de vida útil da edificação. No TC, a fase de manutenção aparece em seguida da operação por conta da telha cerâmica e, novamente, pela queima de combustíveis fósseis no forno durante a fabricação do produto. Na fase de produção, a telha cerâmica tem a maior participação seguida do cimento.

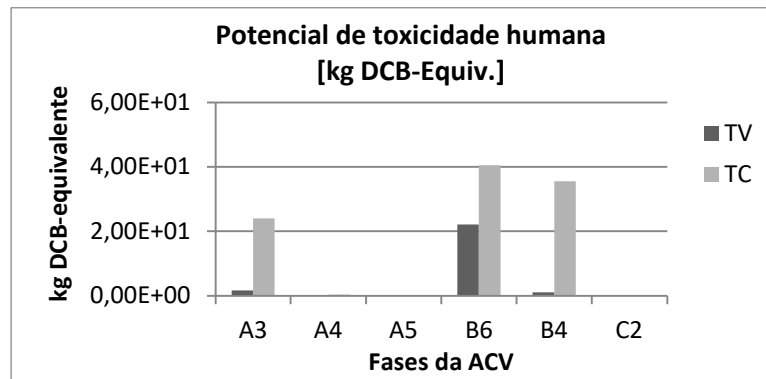


FIGURA 8: Resultado de toxicidade humana (kg DCB-equivalente).

FONTE: Autoria própria.

4.7 DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO

O potencial para a depleção da camada de ozônio é 92% maior para o telhado verde, em relação ao convencional, pela produção da placa de OSB. A apresentação dos resultados tomou forma diferente para melhor visualização e comparação. A fase A3 é a única que teve relevância no resultado, tendo a fase de produção representado 100% no TV ($5,21 \times 10^{-8}$ kg R11-eq) e 95% no TC ($4,1 \times 10^{-7}$ kg R11-eq), seguida pela fase de manutenção. No TC, o aço representa a maioria da contribuição na fase de produção e a telha na de manutenção. Mesmo assim, os valores são de uma ordem de grandeza muito baixa e não é uma categoria de impacto relevante para essa situação.

4.8 CRIAÇÃO DE OZÔNIO FOTOQUÍMICO

O potencial de criação de ozônio fotoquímico (Figura 9) é a formação de ozônio na troposfera pela presença de outros gases poluentes: os compostos orgânicos voláteis (COVs), o monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO e NO₂). A partir deles, forma-se o *smog* fotoquímico, uma espécie de fumaça que é desencadeada pela luz solar e que gera ozônio como produto. Ozônio em altas concentrações e na troposfera se torna tóxico para os seres vivos. A unidade de medida para o potencial de ozônio fotoquímico é quilograma de etileno equivalente ou C₂H₄ equivalente.

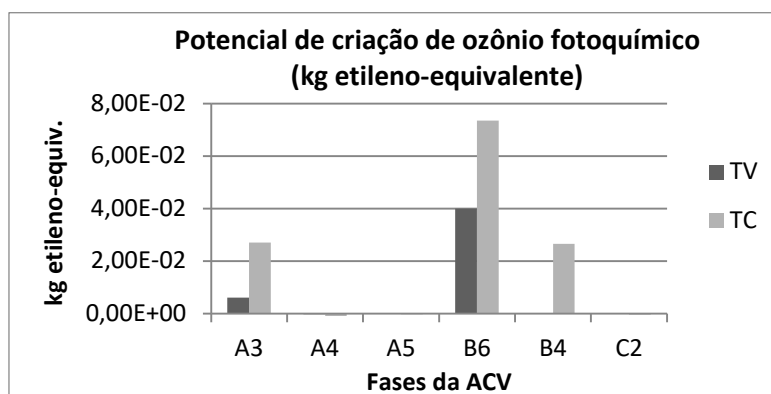


FIGURA 9: Resultado do Potencial de criação de ozônio fotoquímico (kg etileno-equivalente).

FONTE: Autoria própria.

Todos os valores negativos apresentados nos resultados são provenientes do transporte, relacionados com o caminhão. Isso acontece porque o etileno é utilizado como anticongelante da água do radiador. Ou seja, é "retirado" do meio ambiente para ser utilizado em veículos. Porém, por ser altamente tóxico para seres humanos, o descarte deve ser cuidadosamente planejado e isso deve ser considerado.

Obviamente, a fase de operação é a maior contribuinte do valor total desta categoria de impacto em ambos os sistemas de cobertura analisados. Ademais, no TV, a madeira e o módulo plástico são os maiores responsáveis e isso ocorre na fase de produção.

No TC, a fase de manutenção precede a fase de produção, mas em ambos os casos, a telha cerâmica é o material responsável. Isso ocorre tanto pela combustão dos fornos, quanto pela desidratação argila, matéria prima principal (Souza et al., 2008).

4.9 VISÃO GLOBAL

A Tabela 4 contém o resultado total por categoria de impacto ambiental da ACV de berço ao túmulo. O resultado está dividido em telhado convencional (TC) e telhado verde (TV). Na tabela, contém também o resultado em percentual de telhado verde para telhado convencional. Percebe-se, então, que o TV só foi desfavorável em duas categorias de impacto: depleção abiótica (recursos) e potencial de depleção da camada de ozônio. Em todas as outras categorias, o telhado verde se mostrou mais favorável.

O ponto crítico para o telhado convencional foi a telha cerâmica, já para o telhado verde foi a madeira. No caso da cerâmica, serve de alerta e discussões futuras pela utilização em larga escala na cultura do processo construtivo brasileiro, inclusive vedações verticais. A utilização da madeira no TV pode ser um incentivo para buscas de outros materiais renováveis, como o bambu.

TABELA 4: Resultado da ACV de berço ao túmulo e razão entre as coberturas analisadas.			
CATEGORIA DE IMPACTO	TC	TV	RELAÇÃO TV/TC
Depleção Abiótica (recursos)	1,95x10 ⁻⁵	2,88x10 ⁻⁵	148%
Depleção Abiótica (combustíveis fósseis)	3270,97	805,72	25%
Potencial de Acidificação	1,89	0,86	46%
Potencial de Eutrofização	0,10	0,034	34%
Potencial de Ecotoxicidade de água doce	3,65	1,75	48%
Potencial de aquecimento global (100 anos)	781,27	322,07	41%
Potencial de aquecimento global (100 anos), excluindo carbono biogênico	878,33	392,87	45%
Potencial de Toxicidade Humana	100,40	24,70	25%
Potencial de Ecotoxicidade marinha	710681,94	31421,86	4%
Potencial de depleção da camada de ozônio	4,32x10 ⁻⁸	5,21x10 ⁻⁷	1207%
Potencial de criação do ozônio fotoquímico	0,11	0,046	40%
Potencial de Ecotoxicidade terrestre	1,64	0,79	48%

FONTE: Autoria própria.

5. CONCLUSÕES

A ACV é uma ferramenta adequada para quantificar impactos ambientais no ciclo de vida de edificações. A fase de uso possui maior contribuição em toda a vida útil de edifícios. A ACV de berço ao túmulo comparando um telhado convencional com um telhado verde permite a escolha de métodos construtivos com menores impactos em uma habitação de interesse social.

A substituição do telhado convencional (TC) comumente utilizado no país, por uma proposta de cobertura em TV é promissora, já que foram vistas melhorias ambientais nas categorias de impacto analisadas nesse estudo.

A melhora do desempenho ambiental do telhado verde (TV), na etapa de execução, reforça a vantagem da utilização de sistemas com menor demanda de energia elétrica para execução ou instalação e, assim, alcançar a redução do consumo energético nas construções do país.

O consumo de energia elétrica na etapa operacional para condicionamento ambiental da edificação com telhado verde (TV) foi 45,6% menor que a mesma edificação com telhado convencional (TC). Esse resultado está diretamente relacionado com as características térmicas dos sistemas. A relação é estreita com a transmitância térmica (U), visto que a capacidade térmica (CT) é praticamente a mesma dos dois sistemas. Quanto menor a transmitância, menor é o consumo de aparelhos condicionadores de ar para alcançar a temperatura de conforto.

Uma contribuição importante deste estudo é a conversão de consumo elétrico da etapa operacional (B6) em categorias de impacto, inserida no *GaBi*. Assim, foi possível observar o real impacto desta para correlacionar com o desempenho térmico dos sistemas de cobertura. A etapa operacional, inclusive, foi a que apresentou maior valor dentre as fases da ACV em todas as categorias de impacto (exceto para o potencial de depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade marinha para o TC e depleção abiótica de recursos para o TV). Isso é um resultado esperado, diante do elevado valor de vida útil da edificação, o que promove um desbalanceamento quando comparado às outras fases do ciclo de vida. Isso torna necessário um estudo individual para a fase de uso, além de considerar a influência do fator tempo nessa análise.

Em termos de materiais, a telha cerâmica representa a maior contribuição em termos gerais para o TC, especialmente pela combustão nos fornos e queima de combustíveis fósseis. A produção (A3) da madeira para o TV pode ser substituída por materiais mais favoráveis ambientalmente e melhorar ainda mais o desempenho dessa cobertura. Além do sequestro de carbono que pode ser um ponto favorável e até podem ser sugeridos outros biomateriais para o favorecimento ambiental do TV.

A etapa de manutenção (B4) deve ser pensada com maior cautela, visto que a reposição de materiais durante a vida útil da edificação pode representar um aumento considerável nos impactos ambientais no ciclo de vida. A etapa de construção (A5) e fim de vida (C2) foram as de menor contribuição para as duas coberturas.

Como limitação do estudo, é importante ressaltar que o banco de dados utilizados contém muitos materiais não adaptados ao contexto brasileiro. O cenário de reposição e manutenção pode variar, assim como o tipo de estrutura, o tipo de TV (intensivo ou extensivo) e espécie de planta considerada. A vegetação não foi incluída e seus benefícios podem influenciar na ACV final.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005. 30 p.
- _____. **NBR 15.575-4**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.
- AGOPYAN, V. et al. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras**. Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 volumes. 1355 p. Setembro de 1998.
- AGYEKUM, E.; FORTUIN, K.; VAN DER HARST. Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 1069-1080, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.012>.
- BENGOA, X. Quantis International. Análise comparativa do ciclo de vida das Telhas cerâmicas versus Telhas de concreto. Montreal: Anicer, 2011. 77 p.
- BLACKHURST, M.; HENDRICKSON, C.; MATTHEWS, H. Cost-effectiveness of green roofs. **Journal of Architectural Engineering**, v. 16, p. 136-143, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000022](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000022).
- BRITISH STANDARD. **EN 15804**: 2012. Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products. Brussels European Committee for Standardization, 2019.
- CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de Light Steel Frame**. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174 p., 2016.
- COMA, J.; PÉREZ, G.; SOLÉ, C.; CASTELL, A.; CABEZA, L. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1106-1115, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>.
- CONTARINI, A.; MEIJER, A. LCA comparison of roofing materials for flat roofs. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 4, p. 97-109, 2015. <https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2014-0031>.
- CUBI, E.; ZIBIN, N.; THOMPSON, S.; BERGERSON, J. Sustainability of Rooftop Technologies in Cold Climates: Comparative Life Cycle Assessment of White Roofs, Green Roofs, and Photovoltaic Panels. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, p.249-262, 2015.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.170>
- GAN, V. J. L.; CHENG, J. C. P.; LO, I. M. C.; CHAN, C. M. Developing a CO₂ e accounting method for quantification and analysis of embodied carbon in high-rise buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 825-836, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.126>.
- KOSAREO, L; RIES, R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. **Building and Environment**, V. 42, p. 2603-2613, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.019>.
- KOURA, J.; MANNEH, R.; BELARBI, R.; EL KHOURY, V.; EL BACHAWATI, M. Comparative cradle to grave environmental life cycle assessment of traditional and extensive vegetative roofs: An application for the Lebanese context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 3, p. 423-442, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01700-z>.
- LAMNATOU, C.; CHEMISANA, D. Evaluation of photovoltaic-green and other roofing systems by means of ReCiPe and multiple life cycle-based environmental indicators. **Building and Environment**, v. 93, p.376-384, 2015.
- PEDROSO, G. M. **Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 226p, 2015.

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, n. 1, p.274-287, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.038>.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

SOUZA, V. P.; TOLEDO, R.; HOLANDA, J. N. F.; VARGAS, H., FARIA JR, R. T. Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Cerâmica**, v. 54, p. 351-355, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000300013>.

YELLISHETTY, Mohan; MUDD, Gavin M.; RANJITH, P.G. The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p.78-90. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.020>.