



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE BASE BIOLÓGICA NA CONSTRUÇÃO

Livia Cosentino^a; Claudia Jacinto^a; Adilson C. Paula Junior^a; Jorge Fernandes^a; Ricardo Mateus^a

^aISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Alameda da Universidade, 4800-058, Guimarães, Portugal, ricardomateus@civil.uminho.pt

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é fundamental na análise do desempenho ambiental dos produtos de construção, do início ao fim de sua vida útil. Os materiais de construção são responsáveis por impactos consideráveis, representando cerca de 10% das emissões globais. Este estudo compara o desempenho ambiental de materiais de base biológica com materiais convencionais, destacando o potencial da ACV na promoção de um ambiente construído mais sustentável. A metodologia baseia-se na ferramenta de avaliação relativa da sustentabilidade de soluções construtivas (MARS-SC), e na revisão da literatura sobre ACV aplicada a produtos de construção, com o foco em materiais de isolamento térmico, incluindo materiais não-convencionais. Os resultados indicam vantagens significativas dos materiais de base biológica, destacando-se o baixo impacto ambiental de painéis com canas (*Arundo donax*). Conclui-se a importância de realizar análises de ACV na seleção de materiais, o que permite realçar as vantagens ambientais dos materiais de base orgânica. No artigo identificam-se também desafios futuros, como a disponibilidade de matérias-primas e recomenda-se a inclusão de parâmetros adicionais, como funcionais e económicos, para uma avaliação holística da sustentabilidade dos materiais de base orgânica.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Desempenho ambiental, Biomateriais, Construção sustentável.



1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um dos maiores problemas que a humanidade enfrenta atualmente, sendo causadas principalmente pela elevada concentração de gases de efeito estufa (GEE) provenientes do uso de combustíveis fósseis e processos industriais (IPCC, 2022). Em 2022, um dos setores com maior impacto ambiental foi a indústria da construção civil, sendo responsável por 34% do uso global de energia e 37% das emissões globais de GEE (UNEP, 2024).

O ciclo de vida de um produto de construção inclui todos os processos e impactos desde a extração de matérias-primas, produção, construção, uso e manutenção e, por fim, a demolição e o tratamento de resíduos (Figura 1) (ISO 15804, 2012). No caso dos edifícios, a maior parte dos seus impactos ambientais está associada à fase de utilização (Schiaivoni *et al.*, 2016). No entanto, em edifícios energeticamente eficientes, os impactos ambientais incorporados dos produtos de construção representam cerca de 45-50% do total do ciclo de vida, podendo ultrapassar 90% em casos extremos (Rock *et al.*, 2020). Assim, avaliar e compreender os impactos de ciclo de vida é essencial para tomar decisões mais conscientes e informadas no planeamento, construção e gestão de edifícios.

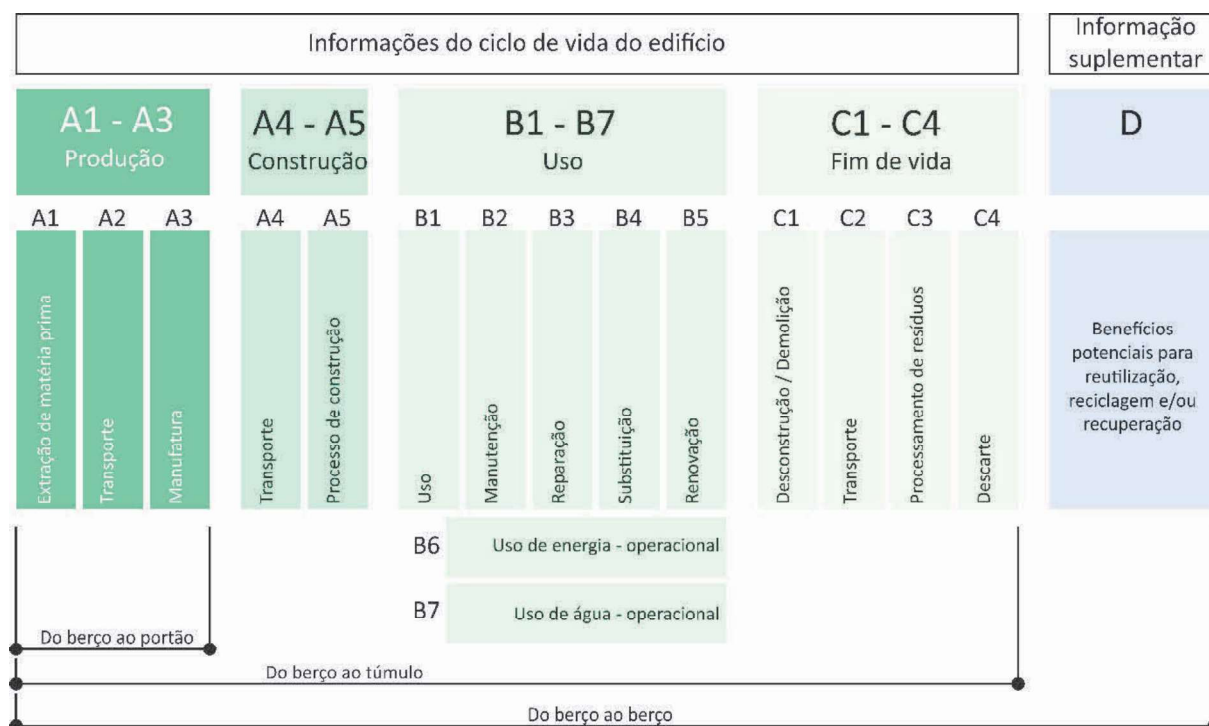


Figura 1 – Etapas do ciclo de vida de um edifício (adaptada de ISO 15804 (2012))

O método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente aceite para avaliar os impactos ambientais que resultam da manufatura de um produto, processo ou serviço ao longo da sua vida útil (IPCC, 2022; Kotula & Kamari, 2020; Schiaivoni *et al.*, 2016). Este método permite estimar os efeitos totais ou parciais, tanto adversos como positivos, sobre o ambiente natural, considerando diferentes etapas do ciclo de vida de uma construção, como mostra a Figura 1. As suas abordagens metodológicas incluem análise de inventário, avaliação de impacto, normalização, métodos de alocação e análise de incerteza (Barbhuiya & Das, 2023).

Destaca-se o potencial da ACV como um instrumento valioso para que projetistas, construtores e decisores de políticas públicas possam avaliar e comparar o desempenho ambiental dos produtos, promovendo o desenvolvimento de alternativas ecológicas e impulsionando a sustentabilidade global



(Singh *et al.*, 2013). Assim, ao integrar as considerações da ACV no processo de design e construção, é possível construir edifícios com um perfil mais sustentável.

A ACV apresenta diversos benefícios na avaliação de materiais de construção, incluindo uma visão holística dos impactos ambientais e a capacidade de identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria ao longo de seu ciclo de vida (Liu *et al.*, 2023). Os avanços recentes nessa área abrangem princípios de economia circular, alternativas renováveis, inovações tecnológicas e implicações políticas. Contudo, os desafios e direções futuras na sua implementação envolvem questões como qualidade dos dados, padronização, integração de aspetos sociais e colaboração entre indústria e investigação (Barbhuiya & Das, 2023).

A Organização Internacional de Padronização (ISO) promulgou em 2006 as normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b) com o objetivo de estabelecer os princípios e a estrutura técnica para avaliação do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço. Já no setor da construção, outras normativas, como a EN15804, surgem como forma de orientar o desenvolvimento e classificação de produtos de modo a contribuir para a conscientização do impacto ambiental, em especial, dos materiais de construção. A Figura 2 exemplifica as normativas referentes ao tema de acordo com sua especificidade.

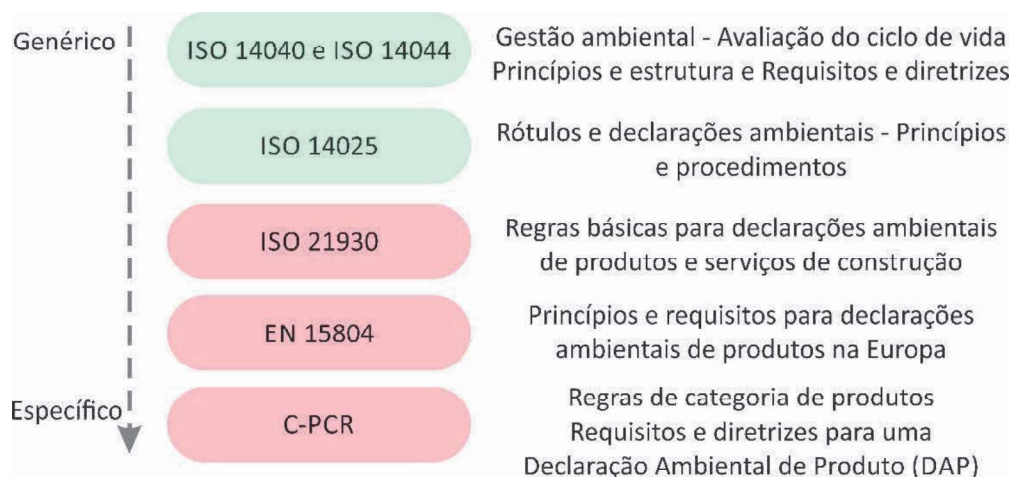


Figura 2 – Organograma de normas que influenciam a classificação de materiais de construção

Embora estudos anteriores tenham abordado os impactos ambientais dos materiais de construção, a bibliografia existente que compare o desempenho ambiental dos materiais de origem biológica com os materiais convencionais ainda é escassa. Isso deve-se à complexidade na análise dos biomateriais, além dos desafios de sua adoção na construção, como a falta de sensibilização e conhecimento, e o custo inicial mais elevado do que materiais convencionais (Garg, 2018). Neste contexto, alguns investigadores e profissionais da área defendem que o custo dos materiais convencionais não são reais, pois excluem o custo ambiental dos mesmos (Rogers *et al.*, 2022).

O principal objetivo deste artigo é contribuir para reduzir esta lacuna a partir de um estudo comparativo do desempenho ambiental de materiais de isolamento de origem biológica com os materiais convencionais. Pretende-se proporcionar uma melhor compreensão dos impactos causados pelos materiais estudados, auxiliando no processo de decisão. Além disso, o estudo evidencia, ao utilizar declarações ambientais de produtos (DAPs), o contributo da ACV para a promoção da sustentabilidade na construção, uma vez que fornece uma base de dados sólida, facilitando comparações entre diferentes soluções construtivas.



2 METODOLOGIA

O método utilizado neste estudo seguiu as fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): definição de objetivo e âmbito, análise do inventário do ciclo de vida (ICV), a avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados (ISO, 2006a). A análise comparativa e a agregação de indicadores foram desenvolvidas utilizando a ferramenta multicritério de apoio à decisão, nomeadamente, Metodologia para Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC).

A MARS-SC é uma ferramenta multicritério que abrange três dimensões: ambiental, funcional e económica (Mateus *et al.*, 2013; Mateus & Bragança, 2006). Com base no desempenho em cada dimensão, a ferramenta indica as opções mais sustentáveis para requisitos específicos, permitindo a seleção de soluções de construção que equilibrem de forma ótima o menor impacto ambiental, melhor desempenho funcional e maior viabilidade económica. Neste estudo, apenas a dimensão ambiental foi considerada.

Ao evidenciar lacunas nas soluções de construção existentes para atingir metas específicas de sustentabilidade, os resultados obtidos com a MARS-SC oferecem orientações para direcionar esforços de investigação e desenvolvimento na criação de novos materiais, tecnologias e processos. Ao usar dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), embora não forneça diretamente soluções de construção prontas, a metodologia orienta a tomada de decisões informadas e impulsiona o desenvolvimento sustentável na indústria da construção. Essa abordagem crítica promove uma reavaliação necessária das práticas existentes, impulsionando avanços no setor da construção como um todo e incentivando a adoção de práticas de construção mais sustentáveis e circulares (Mateus *et al.*, 2013; Mateus & Bragança, 2006).

2.1 LIMITES DECLARADOS DA UNIDADE E DO SISTEMA

A unidade declarada foi 1 m² de material com resistência térmica de 3 (m² K)/W, que serve como base de comparação ao longo do estudo. Os limites desta pesquisa englobam os impactos ambientais incorporados na etapa de produção dos diferentes materiais de isolamento. A opção de limitar o estudo à fase do berço ao portão é justificada porque o uso e descarte dos materiais estão sujeitos a demasiadas suposições e incertezas de valores a depender da localização e aplicação do material, além de não ser a parte mais representativa dos impactos globais.

2.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

A análise de inventário foi utilizada para quantificar as entradas (ex. energia e materiais) e as saídas (ex. emissões e resíduos) do sistema dos produtos. No inventário estão incluídos a extração de matéria-prima, o seu transporte para o local de manufatura e a produção dos produtos de isolamento. Na MARS-SC, a avaliação do desempenho ambiental é baseada nas seguintes categorias de impacto ambiental: potencial de aquecimento global, destruição da camada de ozono, acidificação do solo e da água, eutrofização, criação de ozono fotoquímico e recursos energéticos primários não renováveis como energia (Mateus *et al.*, 2013; Mateus & Bragança, 2006).

Para a quantificação dessas categorias de impacto ambiental foram consultadas Declarações Ambientais de Produto (DAP), dando prioridade às referentes ao contexto português. Na ausência de informação ambiental específica, recorreu-se ao programa informático de análise de ciclo de vida SimaPro (v. 9.5.0.0) para a modelação dos produtos para os quais não existem DAPs. Os dados do inventário do ciclo de vida foram convertidos em impactos ambientais potenciais, utilizando os



métodos “EN 15804 +A2 (adapted) v1.00” e presentes no software adotado. O Quadro 1 apresenta os indicadores considerados e respectivas unidades e método de avaliação.

Quadro 1 – Indicadores, unidades e métodos de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) utilizados

Indicadores ambientais	Unidade	Método de AICV
Potencial de Aquecimento Global (GWP)	kgCO ₂ eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de destruição da camada de ozono (ODP)	kgCFC-11eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de acidificação (AP)	mol H ⁺ eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de criação fotoquímica de ozono (POCP)	kg NMVOC eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Potencial de eutrofização (EP)	kg P eq	EN 15804 +A2 (adapted) v1.00
Uso de recursos naturais	Unidade	Método de AICV
Recursos energéticos primários não renováveis como energia (NRE)	MJ	Cumulative Energy Demand (LHV) V1.00

2.3 NORMALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO

Para mitigar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros dos diversos indicadores, bem como lidar com a sua variação, sendo que alguns adotam a lógica "quanto maior, melhor" e outros "quanto menor, melhor", foi essencial normalizar os indicadores (Mateus *et al.*, 2013). Para isso, é utilizada a equação de Díaz-Balteiro (Bragança *et al.*, 2013) :

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}}$$

Nesta equação, $\bar{P}_i$ é o resultado da normalização do parâmetro i , P_i é o valor resultante da quantificação, P_i^* e P_{*i} são os melhores e piores valores (menor e maior impacto, respetivamente) dentre os obtidos na quantificação.

A combinação de cada indicador ambiental num indicador global, que sintetiza o desempenho ambiental geral, foi conduzida conforme metodologia previamente descrita em estudos anteriores (Mateus *et al.*, 2013; Mateus & Bragança, 2006). Os resultados são apresentados sob a forma de diagrama "radar", no qual o número de raios correspondeu ao número de indicadores analisados. Cada perfil sustentável permite a monitorização do desempenho geral dos diferentes tipos de isolamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a avaliação, foram selecionados oito tipos distintos de produtos de isolamento térmico, abrangendo desde os produtos convencionalmente utilizados até alternativas de base orgânica, não convencionais e de natureza mais inovadora. O Quadro 2 aponta as informações técnicas necessárias para a aplicação do método escolhido. Como apenas a dimensão ambiental será analisada neste



estudo, foi definido para todos os materiais a resistência térmica de 3 (m² K)/W uma vez que é a resistência encontrada na placa padrão de 10cm de XPS.

Quadro 2 – Informações técnicas dos materiais analisados

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutibilidade térmica (W/(mK))	Resistência térmica ((m ² K)/W)	Espessura (m)	kg/m ²
XPS	25,95	0,033	3,00	0,10	2,595
EPS	18,50	0,030	3,00	0,09	1,665
Lã de rocha	95	0,037	3,00	0,11	10,545
Lã de vidro	16	0,037	3,00	0,11	1,776
Painel de cortiça	110	0,039	3,00	0,12	13,455
Fibra de cânhamo	35	0,040	3,00	0,12	4,200
Fardo de palha	100	0,052	3,00	0,16	15,600
Painel de Arundo Donax	190,6	0,06	3,00	0,18	34,308

Os dados ambientais e técnicos, nomeadamente os coeficientes de condutibilidade térmica e os dados impactes ambientais dos materiais, foram retirados de DAPs baseadas na normativa EN 15804+A2:2019, com exceção dos dados relativos à cana Arundo Donax. Para este material, as informações técnicas do Quadro 2 foram obtidas através do trabalho de investigação de Malheiro *et al.* (2021) e os dados de impactes ambientais foram obtidos através do software SimaPro 9.5.0.0, como mencionado anteriormente. O Quadro 3 apresenta os impactes referentes a cada material estudado.

Quadro 3 – Dados dos impactes ambientais dos materiais utilizados por kg

Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Ref.
XPS	3,25E+00	2,57E-08	6,54E-03	4,93E-03	4,48E-02	8,72E+01	(The international EPD, 2023e)
EPS	4,54E+00	8,43E-08	1,49E-02	1,15E-02	7,79E-02	9,08E+01	(The international EPD, 2023a)
Lã de rocha	1,01E+00	2,10E-12	1,12E-02	2,57E-03	2,24E-02	1,55E+01	(The international EPD, 2023d)
Lã de vidro	2,36E+00	2,34E-07	2,75E-02	4,97E-02	3,03E-01	2,36E+01	(The international EPD, 2023b)
Painel de cortiça	- 1,77E+01	7,83E-08	1,23E-02	1,57E-02	1,64E-01	9,13E+00	(EPD Hub, 2023)
Fibra de cânhamo	- 1,77E+00	1,19E-08	1,54E-03	1,14E-03	1,69E-02	5,89E+00	(The international EPD, 2023c)



Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Ref.
Fardo de palha	- 1,16E+00	1,05E-08	1,43E-03	4,48E-04	1,65E-02	9,38E-01	(The international EPD, 2022)
Painel de Arundo Donax	-5,39E-01	9,73E-10	3,63E-04	6,01E-04	2,69E-05	8,20E-01	-

Os impactos ambientais foram ajustados com base na quantidade utilizada ao considerar 1m² de cada material, como mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Impactes dos materiais para 1m²

Material	Kg/m ²	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE
XPS	2,595	8,44E+00	6,66E-08	1,70E-02	1,28E-02	1,16E-01	2,26E+02
EPS	1,665	7,56E+00	1,40E-07	2,48E-02	1,91E-02	1,30E-01	1,51E+02
Lã de rocha	10,545	1,06E+01	2,22E-11	1,18E-01	2,71E-02	2,37E-01	1,63E+02
Lã de vidro	1,776	4,19E+00	4,16E-07	4,88E-02	8,82E-02	5,38E-01	4,19E+01
Painel de cortiça	13,455	-2,39E+02	1,05E-06	1,66E-01	2,12E-01	2,20E+00	1,23E+02
Fibra de cânhamo	4,200	-7,42E+00	4,99E-08	6,47E-03	4,78E-03	7,10E-02	2,47E+01
Fardo de palha	15,600	-1,81E+01	1,63E-07	2,22E-02	6,99E-03	2,58E-01	1,46E+01
Painel de Arundo Donax	34,308	-1,85E+01	3,34E-08	1,25E-02	2,06E-02	9,24E-04	2,81E+01
Melhor valor (menor impacto)		-2,39E+02	2,22E-11	6,47E-03	4,78E-03	9,24E-04	1,46E+01
Pior valor (maior impacto)		1,06E+01	1,05E-06	1,66E-01	2,12E-01	2,20E+00	2,26E+02

Da análise do impacto de cada categoria nas soluções propostas, observa-se que os produtos derivados de materiais de base biológica são os que revelam um potencial de aquecimento global negativo, devido ao carbono biogénico presente nas plantas. Desta forma, estes destacam-se na categoria do GWP. Nas restantes categorias, estes materiais também exibem, de uma forma geral, um impacto ambiental menor. O painel de cortiça, apesar de apresentar o pior valor em quatro das seis categorias analisadas, continua a destacar-se devido ao seu melhor valor na categoria de potencial de aquecimento global. No caso da fibra de cânhamo, esta é o produto de isolamento com o melhor desempenho nos impactos ambientais de potencial de acidificação (AP) e potencial de criação fotoquímica de ozono (POCP).

Os materiais mais convencionais no mercado, nomeadamente o poliestireno extrudido (XPS) e o poliestireno expandido (EPS), revelam valores de mediano a mau em todas as categorias de impacto, e no que diz respeito ao potencial de aquecimento global, estão entre os três produtos com maior impacto ambiental nesta categoria.



Apenas pelo Quadro 4 é possível fazer uma análise geral de cada material, porém dado que cada categoria tem efeitos únicos na pegada ambiental global, é fundamental aplicar um sistema de ponderação. Os coeficientes de ponderação para cada categoria no MARS-SC foram retirados da Agência de Proteção Ambiental (EPA) (United States Environmental Protection Agency, 1990, 2000) e foram refletidos nos valores do Quadro 5. Foram considerados os seguintes pesos:

- GWP = 38%;
- ODP = 12%;
- AP = 12%;
- POCP = 14%;
- EP = 12%;
- NRE = 12%.

Quadro 5 – Normalização e ponderação dos impactos

Material	GWP	ODP	AP	POCP	EP	NRE	Impacte Ambiental (IA)
XPS	0,009	0,937	0,934	0,961	0,948	0,000	0,476
EPS	0,012	0,867	0,885	0,931	0,942	0,354	0,501
Lã de rocha	0,000	1,000	0,298	0,892	0,893	0,297	0,423
Lã de vidro	0,026	0,605	0,735	0,597	0,756	0,871	0,449
Painel de cortiça	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,488	0,439
Fibra de cânhamo	0,072	0,953	1,000	1,000	0,968	0,952	0,632
Fardo de palha	0,115	0,845	0,901	0,989	0,883	1,000	0,618
Painel de Arundo donax	0,117	0,968	0,962	0,923	1,000	0,936	0,638

A análise comparativa dos materiais de isolamento demonstrou que o painel de canas Arundo Donax apresenta o melhor desempenho em termos ambientais. No entanto, devido ao seu peso, há preocupações quanto ao impacto na integridade estrutural das construções. Nesse contexto, a fibra de cânhamo surge como uma alternativa promissora, proporcionando um equilíbrio entre desempenho ambiental e manutenção da estrutura. O peso mais leve do isolamento em fibra de cânhamo atende às necessidades ambientais sem comprometer a estabilidade das edificações. A partir dos valores normalizados, é possível traçar o perfil de sustentabilidade, como visto no Quadro 6.



Quadro 6 – Perfil de sustentabilidade

XPS	EPS
Lã de rocha	Lã de vidro
Painel de cortiça	Fibra de cânhamo
Fardo de palha	Painel de Arundo donax



4 CONCLUSÕES

Este estudo reforça a importância da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) nas decisões de construção sustentável, destacando a sua capacidade de fornecer uma visão geral do desempenho ambiental dos materiais ao longo de todo o ciclo de vida. Ao considerar os impactos desde a extração de matérias-primas até o descarte final, a ACV permite que projetistas, construtores e decisores políticos tomem decisões informadas que promovam a sustentabilidade ambiental.

Além disso, este estudo destaca as vantagens ambientais dos materiais de base orgânica, como os painéis de cana Arundo donax e a fibra de cânhamo. A fim de superar os desafios de disponibilidade e custos dos materiais de base orgânica em comparação com os mais convencionais, são necessárias estratégias que incentivem a produção e adoção desses materiais alternativos.

Embora a abordagem da MARS-SC possa oferecer uma avaliação mais completa da sustentabilidade dos materiais, optou-se por focar exclusivamente nos aspetos ambientais neste estudo. Isso permitiu uma análise mais detalhada dos impactos ambientais dos materiais, sem diluir o foco com outros critérios. Entretanto, nota-se que a fibra de cânhamo, o fardo de palha e o painel de canas precisam, em média, de 50% mais espessura do que o XPS para atingir a mesma resistência térmica, evidenciando uma diferença significativa que poderia ser considerada em avaliações mais abrangentes.

A inovação deste estudo está na comparação dos impactos ambientais de materiais de isolamento térmico de base biológica com materiais convencionais. No entanto, limitações e incertezas na metodologia de ACV, como a variabilidade dos dados e suposições sobre o ciclo de vida, podem influenciar os resultados e devem ser consideradas.

Quanto às perspectivas de trabalhos futuros, há uma necessidade de investigar com maior profundidade os potenciais benefícios e desafios dos materiais orgânicos na construção sustentável. Isso inclui estudos sobre novas tecnologias de produção, análises de custo-benefício a longo prazo e avaliações do ciclo de vida aprimoradas. Além disso, é importante explorar formas de aumentar a consciencialização e a aceitação desses materiais entre os profissionais da indústria da construção e os consumidores. Esses trabalhos futuros serão essenciais para impulsionar ainda mais a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis e promover a transição para uma economia circular e de baixo carbono.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi também financiado por fundos do Fundo Social Europeu (FSE) e do Programa POR NORTE através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia e do Programa MIT Portugal, ao abrigo do contrato de subvenção atribuído ao 1º autor (PRT/BD/152839/2021) e ao 3º autor (SFRH/BD/151345/2021).

REFERÊNCIAS

Kotula, B. M., & Kamari, A. (2020) "Development of a BIM-based LCA Tool to Support Sustainable Building Design during the Early Design Stage", In The 54th International Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA). Available from: <https://anzasca.net/paper/developmentof-a-bim-based-lca-tool-to-support->



sustainablebuilding-design-during-the-early-design-stage/

- Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, 19(June). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326>
- Bragança, L., Araújo, C., Castanheira, G., Barbosa, J. A., & Oliveira, P. (2013). Approaching sustainability in the built environment. In Proceedings of International Conference SB13 Seoul - Sustainable Building Telegram Toward Global Society.
- CEN. (2012). *EN 15804:2012+A1:2013 - Sustainability of Construction Works e Environmental Product Declarations e Core Rules for the Product Category of Construction Products*. European Committee for Standardization.
- EPD Hub. Environmental Product Declaration: Cork board insulation Amorim. (2023). Disponível em: <http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf>
- Garg, N., Kumar, A., Pipralia, S., & Kumar, P. (2018). Sustainable Building Materials for Energy Efficiency. In *International Conference on Urban Sustainability: Emerging Trends, Themes, Concepts & Practices (ICUS)*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926.011
- ISO 14040. (2006). Environmental Management: Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. (Technical Report)
- ISO 14044. (2006b) Environmental Management Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. (Technical Report)
- Li, X., Zhu, Y., & Zhang, Z. (2010). An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment*, 45(3), 766–775. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.010>
- Liu, F., Shafique, M., & Luo, X. (2023). Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103343.
- Liu, N., Liu, Y., Gong, X. Z., Hao, L. W., Gao, F., Li, X. Q., & Zheng, Y. (2020). Recent Developments on Life Cycle Assessment of Building Materials. *Materials Science Forum*, 993, 1534–1544. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.993.1534
- Rogers, L. (Ed.)(2022). *Material Cultures: Material Reform: Building for a Post-Carbon Future* (1st edition). Mack Books.
- Malheiro, R., Ansolin, A., Guarnier, C., Fernandes, J., Amorim, M. T., Silva, S. M., & Mateus, R. (2021). The potential of the reed as a regenerative building material—characterisation of its durability, physical, and thermal performances. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144276>
- Mateus, R., & Bragança, L. (2006). Tecnologias construtivas para a sustentabilidade da construção.
- Mateus, R., & Bragança, L. (2009). *Avaliação da construção sustentável: propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis*.
- Mateus, R., & Bragança, L. (2011). Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the



- methodology SBTToolPT-H. *Building and Environment*, 46(10), 1962–1971. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.023>
- Mateus, R., Neiva, S., Bragança, L., Mendonça, P., & Macieira, M. (2013). Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls - Comparison with conventional technologies. *Building and Environment*, 67, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.012>
- One click LCA. (2023). *Environmental Product Declaration: Cork board insulation Amorim*. <http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf>
- Röck, M., Saade, M.R.M., Balouktsi, M., Rasmussen, F.N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – the hidden challenge for effective climate change mitigation. *Appl. Energy* 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.
- S. Schiavoni, F. D 'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali. (2016). “Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045
- Singh, A., Olsen, S.I., Pant, D., 2013. Importance of life cycle assessment of renewable energy sources. In: Singh, A, Pant, D, Olsen, S.I. (Eds.), *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, Green Energy and Technology. Springer, London, pp. 1–11. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-44715364-1_1.
- The international EPD. (2022). *Environmental Product Declaration: Straw, School of Natural Building (SNaB)*. www.environdec.com
- The international EPD. (2023a). *Environmental Product Declaration: EPS Kauno silas UAB*.
- The international EPD. (2023b). *Environmental Product Declaration: Glass wool Ursa*. Disponível em: <http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf>. Acesso em 20/03/2024.
- The international EPD. (2023c). *Environmental Product Declaration: Hemp fibre insulation Ekolution AB*. Disponível em: <http://www.brick.org.uk/wp-content/uploads/2014/01/Please-click-here-to-download-the-EDP.pdf>. Acesso em 20/03/2024.
- The international EPD. (2023d). *Environmental Product Declaration: Rock wool Knauf insulation*.
- The international EPD. (2023e). *Environmental Product Declaration: XPS Styropan*. <https://doi.org/10.4324/9780203889565.ch4>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector”, *Global Status Report for Buildings and Construction*. Available from: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>
- United States Environmental Protection Agency. (1990). Reducing risk: Priorities and strategies for environmental protection. In *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/24550-ms>
- United States Environmental Protection Agency. (2000). *Toward integrated environmental decision-making*.