



# ENTAC 2024

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



## Estratégias para desmaterialização de edificações: uma abordagem exploratória

### Strategies for Building Dematerialization: An Exploratory Approach

**Jean Carlos Ravanneli Appel**

UNILA | Foz do Iguaçu | Brasil | jean.apel@hotmail.com

**Katia Regina Garcia Punhagui**

UNILA | Foz do Iguaçu | Brasil | katia.punhagui@unila.edu.br

**Danielly Letícia Rebelato**

UNILA | Foz do Iguaçu | Brasil | danielly\_rebelatto@hotmail.com

#### Resumo

A desmaterialização é uma estratégia considerada para mitigar os impactos ambientais do setor da construção. Acredita-se que, através da redução no uso de materiais para um mesmo desempenho requerido, seja possível minimizar a pegada de carbono, energia e água dos edifícios. O objetivo deste estudo é identificar estratégias para a desmaterialização de edifícios, visando reduzir emissões de carbono pelo menor consumo de materiais. Para isso executou-se uma revisão sistemática da literatura seguida de análise bibliométrica, buscando identificar o direcionamento que o tema tem tomado nas pesquisas científicas recentes, bem como, as estratégias para a desmaterialização que têm sido propostas. Os resultados indicaram que ¼ dos trabalhos levantados são europeus, enquanto o restante está distribuído principalmente entre China (23%), América do Norte (11%) e Oceania (6%), havendo uma lacuna significativa de pesquisas neste tema no Brasil (0%). Do total de 147 artigos analisados, apenas 11 abordam especificamente a desmaterialização para a construção civil. A tendência dos tópicos dentro da temática indica pesquisas com foco em design arquitetônico, construção sustentável e tomada de decisões. Destaca-se o Building Information Modeling (BIM) como ferramenta digital para desmaterialização. Acredita-se que esta primeira aproximação à temática possa contribuir para encaminhamento de pesquisas correlatas ou que busquem identificar estratégias para a descarbonização das construções.

Palavras-chave: Desmaterialização. Descarbonização. Construção. Otimização de design. Desempenho.

#### Abstract

*Dematerialization, is a strategy considered to mitigate environmental impacts of the construction sector, it is possible to minimize the carbon, energy, and water footprint of*



Como citar:

APPEL, J.; PUNHAGUI, K.; REBELATO, D. Estratégias para desmaterialização de edificações: uma abordagem exploratória. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, 2024.

*buildings. The objective of this study is to identify strategies for dematerializing buildings, aiming to reducing carbon emissions through lower material consumption. For this, a systematic literature review followed by bibliometric analysis was carried out, seeking to identify the direction that the theme has taken in recent scientific research, as the strategies for dematerialization. The results indicate that 25% of the surveyed works are from European countries, while the remaining research is primarily distributed among China (23%), North America (11%), and Oceania (6%). With a significant research gap in Brazil (0%). Of the total 147 analyzed articles, only 11 specifically address dematerialization in civil construction. The trend of topics within the theme indicates research focused on architectural design, sustainable construction, and decision-making. Building Information Modeling (BIM) stands out as a digital tool for dematerialization. It is believed that this initial approach to the theme can contribute to the direction of related research or seeking to identify strategies for decarbonization of constructions.*

*Keywords: Dematerialization. Decarbonization. Construction. Design optimization. Performance.*

## INTRODUÇÃO

A preocupação com o aquecimento global, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o aumento da demanda por sustentabilidade nos processos/produtos, coloca os edifícios em foco para a descarbonização. Mundialmente, o setor da construção emite cerca de 37% dos GEE, que resultam do consumo de materiais (10%) e energia (27%) em seus processos produtivos, operação e destinação final das edificações [1]. Estes valores, ainda que aproximados, demonstram a grandeza dos impactos da atividade do setor, que tende a aumentar. Entre 2015 e 2023, a área construída passou de 218 para 250 bilhões de metros quadrados [1][2], e a perspectiva é que continue a crescer a medida da demanda, principalmente nos países em desenvolvimento [3].

Ademais, o desperdício de materiais é um problema crítico na construção civil, com perdas significativas tanto em processos principalmente em canteiros de obras. Os resíduos de construção civil (RCC) representam cerca de 36% dos resíduos urbanos gerados [4]. O descarte em aterros desperdiça recursos, ocupa terras e gera problemas ambientais e de segurança [4].

Assim, a desmaterialização que consiste na redução do consumo de materiais e geração de resíduos por unidade funcional, sem perda do desempenho estabelecido, é uma abordagem que pode ser considerada para descarbonizar o setor. Estudos enfatizam a importância dessa estratégia para diminuir o desperdício e elevar a produtividade [5][6][7][8]. No entanto, a implementação requer uma mudança na mentalidade da indústria e um foco em processos sistemáticos [9].

Embora existam diversas ferramentas e métodos para desmaterializar [10][11][12][13], a adoção de tais estratégias na construção civil é limitada. A literatura sobre a interseção entre construção e estratégias de desmaterialização ou métodos para uso eficiente dos materiais, é escassa e muitas vezes restrita a uma localização geográfica ou ferramenta específica, resultando em conclusões de alcance limitado [14][15][16].

Esta pesquisa tem como objetivo identificar estratégias e direcionamentos de pesquisa para a desmaterialização de edificações, visando a redução do consumo de materiais e a geração de resíduos. A investigação incluirá tecnologias de reaproveitamento, otimização de design, políticas públicas e as estatísticas atuais do setor. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura e análise bibliométrica que buscou identificar as lacunas, abordagens e o direcionamento recente indicados para o tema.

## MÉTODO

Para atender ao objetivo deste estudo, realizou-se uma revisão sistemática da literatura (RS) seguida de análise bibliométrica. Na RS empregou-se as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. A RS foi realizada em três etapas, onde foram analisados os estudos com foco na desmaterialização e sua relação com a construção. Na primeira etapa foram utilizadas palavras-chaves específicas e, nas etapas seguintes, os critérios foram refinados para incluir apenas artigos em inglês e espanhol, dentro das áreas de Engenharias, Ciências Ambientais, Ecologia, Tecnologia da Construção e Ciência dos materiais conforme Figura 1 estes posteriormente passaram por uma triagem demonstrada na Figura 2.

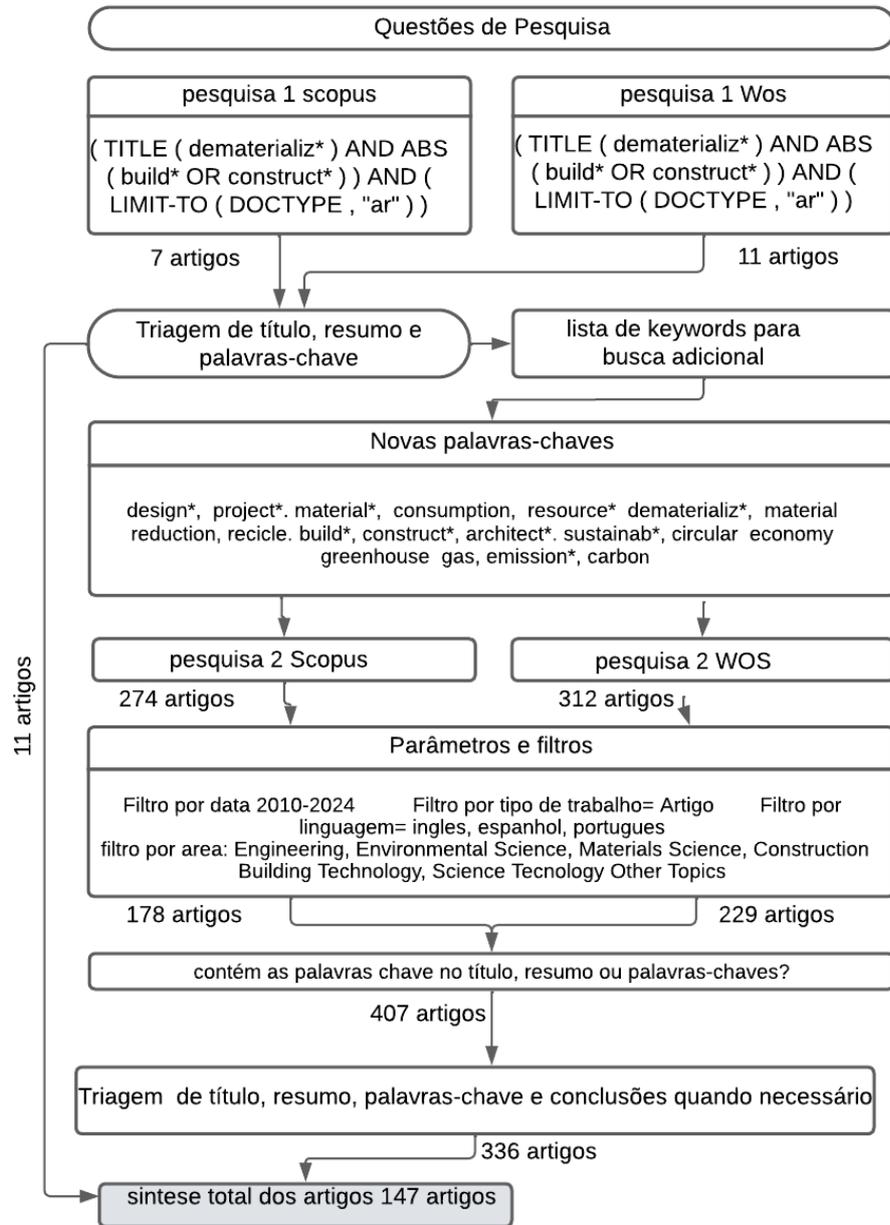
O recorte temporal foi de janeiro de 2010 a abril de 2024. O ano de início foi definido a partir de uma análise preliminar que indicou que a produção científica anterior a 2010 é escassa, com aproximadamente dez publicações identificadas. A pesquisa concentrou-se nos idiomas inglês e espanhol, dado que apenas dois artigos foram encontrados em outros idiomas (Alemão).

A seleção dos trabalhos se deu da seguinte forma: 1) exclusão por tipo de documento, onde considerou-se apenas artigos de revistas científicas; 2) exclusão por tema, onde foram mantidos apenas as áreas relacionadas a construção civil; 3) exclusão por incompatibilidade de conteúdo, removendo artigos que não continham nenhum dos itens da *string* em seus títulos, resumos ou palavras-chave; 4) triagem, onde executou-se a leitura dos títulos, resumos e conclusões quando necessário, estes foram relacionados a temas que melhor se enquadravam.

No processo de triagem das pesquisas a serem analisados buscou-se estudos que compartilhassem o mesmo objetivo deste trabalho, além disso, de responder as seguintes questões de pesquisa:

1. Quais são as atuais estatísticas e dados sobre o uso de materiais que podem influenciar a etapa de design?
2. Quais os atuais dados de *referências comparativas*, estudos de caso ou entrevistas que podem auxiliar no entendimento do status atual das construções que visam a desmaterialização?
3. Quais as tecnologias para melhor aproveitamento de materiais através de reúso, reaproveitamento e durabilidade na construção civil?
4. Quais são as técnicas de otimização de design na construção civil?
5. Quais as estratégias de desmaterialização existentes na construção civil?
6. Quais políticas públicas existem ou devem existir para o avanço da desmaterialização na construção civil?
7. Quais revisões bibliográficas são relevantes para compreender a desmaterialização na construção civil?

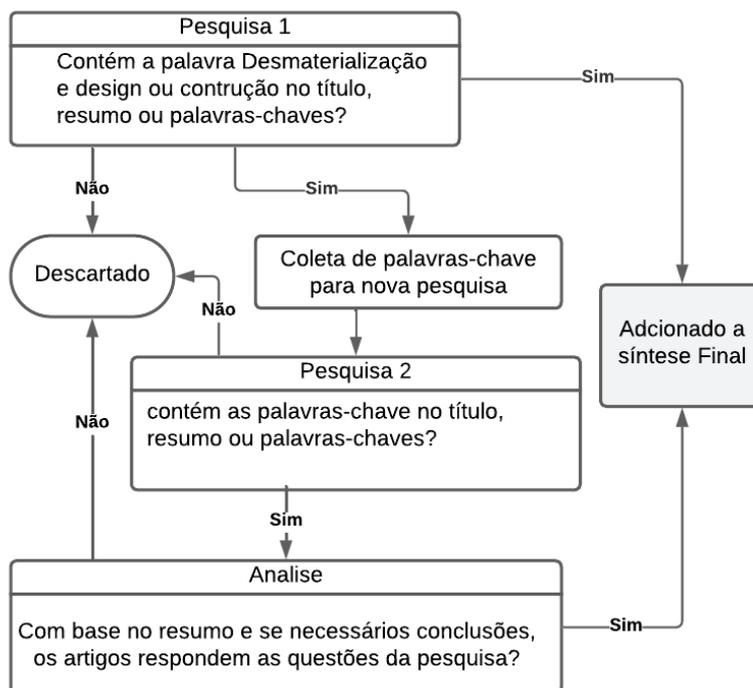
**Figura 1: Esquema do método utilizado para realizar a revisão sistemática da literatura**



Fonte: os autores.

Em seguida, foi realizado um processo de triagem adicional, conforme ilustrado na Figura 2, para determinar a inclusão de publicações na amostra final. Inicialmente, os artigos identificados na Pesquisa 1 passaram por uma avaliação de relevância, onde artigos não pertinentes foram descartados. Artigos considerados relevantes tiveram suas palavras-chave extraídas para uma nova pesquisa, denominada Pesquisa 2. Esta segunda busca gerou um novo conjunto de artigos, que também passou por um filtro de relevância. Os artigos não pertinentes foram descartados, enquanto os relevantes foram combinados com os resultados da Pesquisa 1. Este processo iterativo continuou até que todas as publicações pertinentes fossem identificadas e incluídas. A amostra final resultante deste rigoroso processo de triagem consistiu em 147 artigos adicionados a síntese final.

**Figura 2: O processo de triagem utilizado para filtrar a literatura irrelevante**



Fonte: os autores.

Os 147 artigos selecionados foram classificados e avaliados com base em critérios como o ano de publicação, a afiliação do país do primeiro autor, a revista de publicação e a contribuição para as perguntas de pesquisa. Este método estruturado garante a coleta de dados abrangentes e relevantes para o escopo do estudo, permitindo responder às perguntas da pesquisa de maneira eficaz.

Além disso, o estudo incorporou uma análise bibliométrica utilizando a interface *biblioshiny*, baseada no pacote R *bibliometrix* [17]. Esta análise permitiu uma avaliação profunda dos dados bibliográficos, complementando a revisão sistemática.

Esta abordagem forneceu percepções quantitativas e qualitativas que enriqueceram a compreensão do estado atual da pesquisa e ajudaram a identificar áreas potenciais para futuros estudos.

## RESULTADOS

Na amostra resultante (147 artigos), identifica-se que a maioria dos estudos (35%) se concentra em técnicas de otimização de design na construção civil [18][19][20][21][22][23], frequentemente utilizando ferramentas digitais e muitas vezes em conjunto com a metodologia BIM [11][13][20][24][25]. A desmaterialização é frequentemente associada a estratégias de otimização no design de edificações e melhor aproveitamento de materiais[26][27][28]. Além disso, há um foco crescente em estudos de casos, entrevistas e *benchmarks* que quantificam seu impacto e eficácia

[29][30][31][32][33][34]. Políticas públicas que incentivam essa prática [35][36][37] também foram identificadas no Quadro 1.

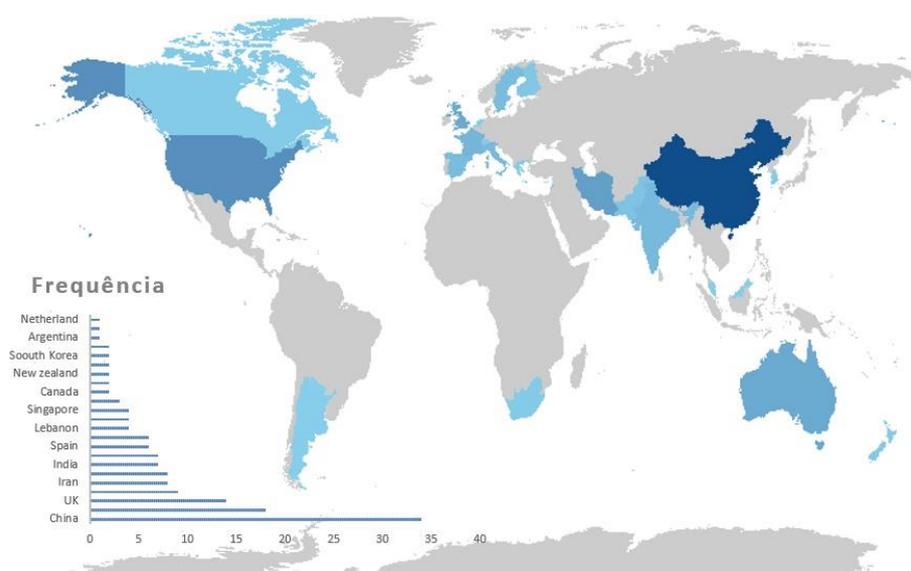
**Quadro 1: Quantificação de artigos por questões da pesquisa**

Questões da pesquisa	Publicações	Percentual
1. Quais são as atuais estatísticas e dados sobre o uso de materiais que podem influenciar a etapa de design?	22	15%
2. Quais os atuais dados de <i>benchmarks</i> , estudos de caso ou entrevistas que podem auxiliar no entendimento do status atual das construções que visam a desmaterialização?	19	13%
3. Quais são as tecnologias para melhor aproveitamento de materiais através de reuso, reaproveitamento e durabilidade na construção civil?	25	17%
4. Quais técnicas de otimização de design na construção civil?	51	35%
5. Quais as estratégias de desmaterialização existentes na construção civil?	11	7%
6. Quais as políticas públicas existentes ou que devem existir para o avanço da desmaterialização na construção civil?	06	4%
7. Quais revisões bibliográficas são relevantes para compreender a desmaterialização na construção civil?	13	9%
<b>TOTAL</b>	<b>147</b>	<b>100%</b>

Fonte: os autores.

A Figura 3 demonstra a distribuição geográfica dos artigos revisados concentra-se principalmente nos países europeus (25% da amostra). As publicações restantes estão predominantemente distribuídas entre China (23%), América do Norte (11%) e Oceania (6%).

**Figura 3: Produção científica anual**

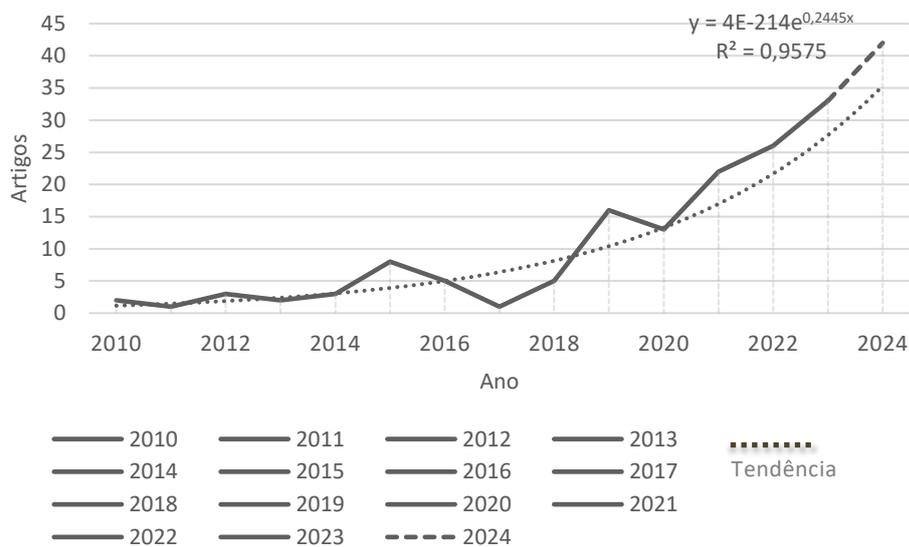


Fonte: os autores.

Se projetarmos que serão publicados 42 artigos ao longo de 2024, considerando que já foram publicados 14 artigos nos primeiros 4 meses, há uma tendência exponencial de crescimento no número de publicações sobre assuntos relacionados a

desmaterialização de edifícios no período de 2010 a 2024 (Figura 4). Sabe-se que esta tendência pode ocorrer pelo maior número de pesquisadores anualmente ingressos na área e devido ao melhoramento constante dos mecanismos de busca. Apensar disto, o crescimento exponencial, leva a crer no aumento da significância do assunto. Fenômeno observado principalmente em países desenvolvidos, com atividade econômica pujante ou populosos (Europa, América no Norte e China).

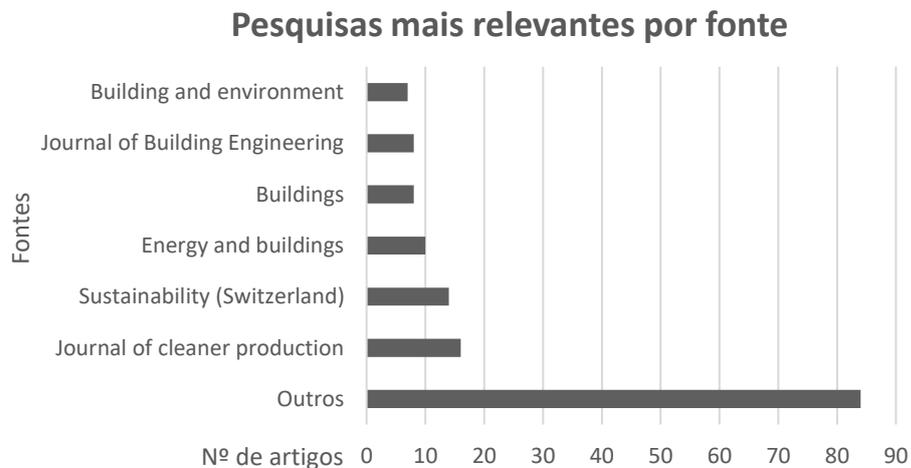
**Figura 4: Produção científica anual**



Fonte: os autores.

Dentre as revistas científicas, apresentadas na Figura 5 as três com maior número de trabalhos no tema foram: *Journal Of Cleaner Production* (11%), *Sustainability (Switzerland)* (10%) e *Energy and Buildings* (7%), com 16, 14 e 10 artigos respectivamente, sendo estes das editoras Elsevier (28%) e MDPI (Instituto de Publicação Digital Multidisciplinar) (15%) das revistas supracitadas.

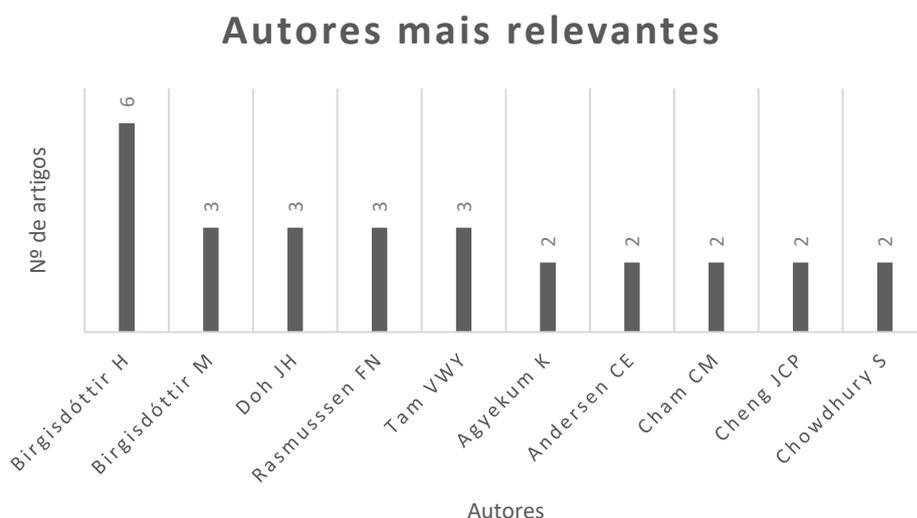
**Figura 5: Pesquisas mais relevantes**



Fonte: os autores.

Os resultados das análises dos autores que conduzem pesquisas relacionadas à *string* foram tratados na Figura 6 onde é apresentado o número de publicações dos dez autores que publicaram o maior número de artigos. Foi observado que Birgisdóttir Harpa teve 6 publicações e os outros autores mais relevantes são Morten Birkved (número de artigos = 3), Jeung-Hwan Doh (n = 3), Rasmus Nøddegaard (n = 3) e Vivian W. Y. Tam (n = 3).

**Figura 6: Autores mais relevantes**

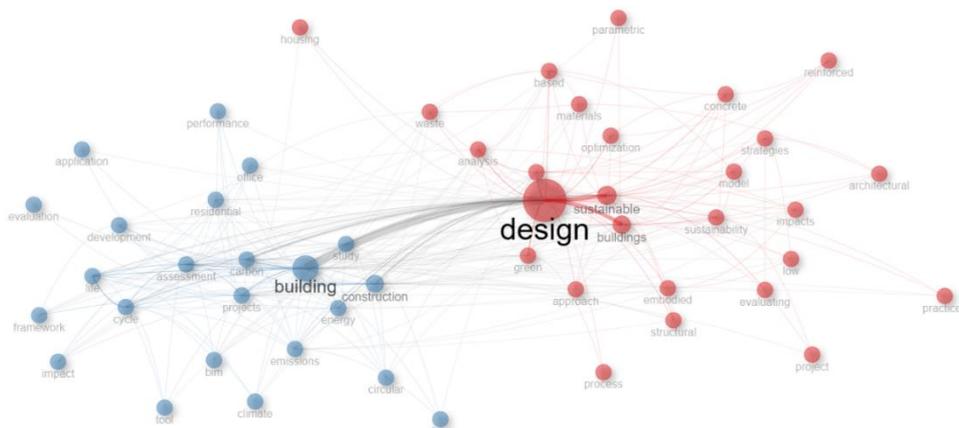


Fonte: os autores.

As palavras mais relevantes encontradas e a frequência de uso ao longo do tempo indicam interesse nos termos *life cycle* (ciclo de vida) [29][34][38][39], *circular economy* (economia circular) [40][41][42] e *energy* (energia) [43][44] como áreas que podem apresentar respostas às perguntas deste artigo.

Em relação ao mapa de rede baseado nas palavras-chave (Figura 7) fica evidenciado que os termos *design* e *building* (construção) tem maior importância para esta pesquisa, assim como permite observar a interação destes termos com as demais palavras-chave dos artigos.

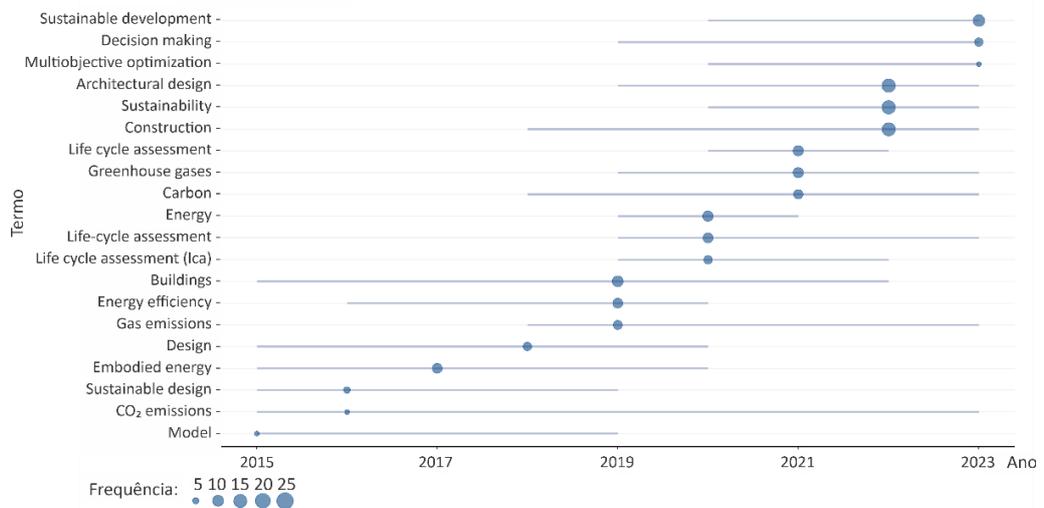
**Figura 7: Mapa de rede baseado nas palavras-chave do autor**



Fonte: os autores.

A análise das tendências de tópicos abordados pelos artigos ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 8, revela uma evolução significativa. Inicialmente, a desmaterialização estava associada a questões ambientais específicas, como emissões e consumo de energia [30][38][45][46][47]. No entanto, essa abordagem gradualmente ampliou seu escopo, considerando também o ciclo de vida dos materiais de construção [15][40][41][42]. Observamos uma expansão ainda maior, chegando à sustentabilidade como um todo [12][14][21][48][49][50]. Essa progressão reflete a busca por estratégias de ação e resolução para enfrentar os desafios da construção civil.

**Figura 8: Tendências de tópicos**



Fonte: os autores.

Por fim, a Figura 9 destaca visualmente os termos mais frequentes, oferecendo uma representação gráfica do vocabulário predominante na literatura revisada.

**Figura 9: Nuvem de palavras**



Fonte: os autores.

A análise bibliométrica revela que os termos mais frequentes na literatura revisada estão fortemente relacionados a área de pesquisa sobre desmaterialização de edificações residenciais. Esses termos incluem *'architectural design'*, *'sustainability'*, *'construction industry'*, *'sustainable development'*, *'circular economy'*, *'life cycle assessment (LCA)'*, *'energy efficiency'*, *'environmental impact'*, *'embodied energy'*, *'greenhouse gases emissions'*, *'carbon emissions'*, *'concrete'* e *'building information modelling'*.

Cada um desses termos desempenha um papel crucial na compreensão e na busca por estratégias eficazes para promover a desmaterialização no contexto da construção civil. Por exemplo, *'architectural design'* está intrinsecamente ligado à otimização do projeto arquitetônico, enquanto *'sustainability'* abrange aspectos ambientais, sociais e econômicos. Além disso, *'life cycle assessment (LCA)'* considera todo o ciclo de vida dos materiais, desde a extração até a disposição final e *'energy efficiency'* foca na redução do consumo energético. Esses termos, em conjunto, refletem a complexidade e a interconexão das questões abordadas na pesquisa sobre desmaterialização de edificações residenciais.

## CONCLUSÃO

A revisão sistemática e análise bibliométrica de 147 artigos, datados de 2010 a 2024, mostram que as estratégias para desmaterialização de edificações abordam a otimização do design (35%) e concentram-se no melhor aproveitamento dos materiais, enfatizando a economia circular e o reaproveitamento de resíduos (17%). Entre os meios para sua implementação destacam-se o design, utilizando-se metodologias e ferramentas computacionais como a plataforma BIM, e análises comparativas.

Na avaliação das estratégias nota-se a importância dos profissionais engenheiros e arquitetos para a efetivação da desmaterialização no setor (13%). Somado a isto, está o fomento por políticas públicas (4%) e a normatização de parâmetros de eficiência para edificações.

Além disso, observa-se uma evolução no tema, que tem migrado de estudos focados em aspectos ambientais específicos, como consumo de energia, uso eficiente de materiais e emissões, para abordagens mais holísticas, abrangendo o desenvolvimento sustentável e a economia circular. É importante notar que a maior parte das pesquisas se origina de países com economias robustas, desenvolvidas ou densamente povoadas, como Europa (25%), China (23%) e América do Norte (11%). Isso sugere a necessidade de melhor aproveitamento econômico ambiental dos recursos materiais disponíveis, para responder aos interesses e necessidades locais.

Percebe-se uma tendência exponencial nas publicações no tema, que pode indicar o aumento de sua relevância no segmento da construção. No entanto, há uma lacuna significativa de pesquisas aplicadas ao contexto brasileiro (0%). Assim, para que o país possa avançar na agenda do desenvolvimento sustentável, apoiado pelo setor da construção, é necessário ampliar o escopo das pesquisas científicas; geração de

indicadores formação técnica especializada; viabilização de ferramentas; e fomento por meio de políticas públicas.

## REFERÊNCIAS

- [1] PROGRAMME, U. N. E. **2024 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector.** 2024.
- [2] **Global Status report for buildings and construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.** 2022.
- [3] SUN, Z. et al. **Carbon Peak and Carbon Neutrality in the Building Sector: A Bibliometric Review.** Buildings, v. 12, n. 2, p. 128, 2022.
- [4] DUAN, H. et al. **Construction debris becomes growing concern of growing cities.** Waste Management, v. 83, p. 1–5, jan. 2019.
- [5] LUANGCHAROENRAT, C. et al. **Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective.** Sustainability, v. 11, n. 13, p. 3638, 2 jul. 2019.
- [6] AILENEI, E. C. et al. **New Waste-Based Composite Material for Construction Applications.** Materials, v. 14, n. 20, p. 6079, 14 out. 2021.
- [7] LAI, Y.-Y. et al. **Management and Recycling of Construction Waste in Taiwan.** Procedia Environmental Sciences, v. 35, p. 723–730, 2016.
- [8] SHAO, Z. et al. **Evolutionary game model of construction enterprises and construction material manufacturers in the construction and demolition waste resource utilization.** Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, v. 41, n. 2, p. 477–495, fev. 2023.
- [9] RUIZ, P. V.; FONTANINI, P. S. P. **Investigação do Fluxo de Materiais na Construção Civil – Avaliação Do Atraso Em Uma Cadeia De Blocos De Concreto.** Em: XVIII Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. Porto Alegre, Brasil: 4 nov. 2020. Disponível em: <<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1019>>. Acesso em: 26 abr. 2024
- [10] DI STEFANO, A. G.; RUTA, M.; MASERA, G. **Advanced Digital Tools for Data-Informed and Performance-Driven Design: A Review of Building Energy Consumption Forecasting Models Based on Machine Learning.** APPLIED SCIENCES-BASEL, v. 13, n. 24, 2023.
- [11] MOHAMMED, M. et al. **Beneficial Effects of 3D BIM for Pre-Emptying Waste during the Planning and Design Stage of Building and Waste Reduction Strategies.** Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 6, 2022.
- [12] OLSSON, S.; MALMQVIST, T.; GLAUMANN, M. **An approach towards sustainable renovation-A tool for decision support in early project stages.** Building and Environment, v. 106, p. 20–32, 2016.
- [13] WANG, W. J. **Automatic System Design of Assembly Building Components for Sustainable Building Projects Based on BIM Technology.** MATHEMATICAL PROBLEMS IN ENGINEERING, v. 2022, 2022.
- [14] WANG, X.; TEIGLAND, R.; HOLLBERG, A. **Identifying influential architectural design variables for early-stage building sustainability optimization.** Building and Environment, v. 252, 2024.
- [15] LOVRENČIĆ BUTKOVIĆ, L.; MIHIĆ, M.; SIGMUND, Z. **Assessment methods for evaluating circular economy projects in construction: a review of available tools.** International Journal of Construction Management, v. 23, n. 5, p. 877–886, 2023.

- [16] MEDINA, E. M.; FU, F. **A new circular economy framework for construction projects**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability, v. 174, n. 6, p. 304–315, 2021.
- [17] BÜYÜKKIDIK, S. **A Bibliometric Analysis: A Tutorial for the Bibliometrix Package in R Using IRT Literature**. Eğitimde ve Psikolojide Ölçme ve Değerlendirme Dergisi, v. 13, n. 3, p. 164–193, 30 set. 2022.
- [18] BELUCIO, M. et al. **Eco-efficiency in early design decisions: A multimethodology approach**. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 283, 2021.
- [19] HOU, S. J.; LI, H. J.; REZGUI, Y. **Ontology-based approach for structural design considering low embodied energy and carbon**. ENERGY AND BUILDINGS, v. 102, p. 75–90, 2015.
- [20] GAN, V. J. L. et al. **Holistic BIM framework for sustainable low carbon design of high-rise buildings**. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 195, p. 1091–1104, 2018.
- [21] GHAREHBAGHI, K. et al. **Versatility in sustainable building design (SBD) practices: an empirical study**. International Journal of Building Pathology and Adaptation, v. 40, n. 5, p. 728–752, 2022.
- [22] MENG, Q. et al. **Assessing the environmental impact of building life cycle: A carbon reduction strategy through innovative design, intelligent construction, and secondary utilization**. Developments in the Built Environment, v. 16, 2023.
- [23] ZENG, Z. et al. **A comprehensive optimization framework for the design of high-performance building systems**. Journal of Building Engineering, v. 65, 2023.
- [24] GHANBARI, M.; RUSCH, R.; SKITMORE, M. **BIM-based environmental assessment of residential renovation projects during the operational phase**. Architectural Engineering and Design Management, 2024.
- [25] LI, Q. et al. **A BIM–LCA Approach for the Whole Design Process of Green Buildings in the Chinese Context**. Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 4, 2023.
- [26] WENIG, C. et al. **Advanced materials design based on waste wood and bark**. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES, v. 379, n. 2206, 2021.
- [27] JALIL, Z. A.; NAJI, H. I.; MAHMOOD, M. S. **Developing Sustainable Alternatives from Destroyed Buildings Waste for Reconstruction Projects**. CIVIL ENGINEERING JOURNAL-TEHRAN, v. 6, n. 1, p. 60–68, 2020.
- [28] DENG, J. X. et al. **Analysis of the Performance of Recycled Insulation Concrete and Optimal Mix Ratio Design Based on Orthogonal Testing**. MATERIALS, v. 16, n. 16, 2023.
- [29] FELICIONI, L. et al. **A comparative cradle-to-grave life cycle approach for addressing construction design choices: An applicative case study for a residential tower in Aalborg, Denmark**. ENERGY AND BUILDINGS, v. 298, 2023.
- [30] AHMAD, T. et al. **Design parametric analysis of low-energy residential buildings on the way to a defined cost-optimal capacity point**. ALEXANDRIA ENGINEERING JOURNAL, v. 61, n. 10, p. 8297–8313, 2022a.
- [31] RASMUSSEN, F. N.; BIRKVED, M.; BIRGISDÓTTIR, H. **Low- carbon design strategies for new residential buildings - lessons from architectural practice**. ARCHITECTURAL ENGINEERING AND DESIGN MANAGEMENT, v. 16, n. 5, p. 374–390, 2020.
- [32] ALI, A. H. et al. **Modelling the role of modular construction's critical success factors in the overall sustainable success of Egyptian housing projects**. Journal of Building Engineering, v. 71, 2023.

- [33] TRINH, H. et al. **Environmental considerations for structural design of flat plate buildings - Significance of and interrelation between different design variables.** JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 315, 2021.
- [34] ZHOU, Y. J.; TAM, V. W. Y.; LE, K. N. **Sensitivity analysis of design variables in life-cycle environmental impacts of buildings.** JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, v. 65, 2023.
- [35] RIOS, F. C.; GRAU, D.; BILEC, M. **Barriers and Enablers to Circular Building Design in the US: An Empirical Study.** JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT, v. 147, n. 10, 2021.
- [36] JIA, J. et al. **Government Performance Evaluation in the Context of Carbon Neutrality: Energy-Saving of New Residential Building Projects.** Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 3, 2022.
- [37] STANITSAS, M.; KIRYTOPOULOS, K.; ARETOULIS, G. **Evaluating organizational sustainability: A multi-criteria based-approach to sustainable project management indicators.** Systems, v. 9, n. 3, 2021.
- [38] AZZOUZ, A. et al. **Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design: A case study in London, UK.** ENERGY AND BUILDINGS, v. 139, p. 547–568, 2017.
- [39] ANDERSON, J. E.; SILMAN, R. **A life cycle inventory of structural engineering design strategies for greenhouse gas reduction.** Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), v. 19, n. 3, p. 283–288, 2009.
- [40] AMARASINGHE, I.; HONG, Y.; STEWART, R. A. **Development of a material circularity evaluation framework for building construction projects.** Journal of Cleaner Production, v. 436, 2024.
- [41] DOMINGO-CALABUIG, D. et al. **Design strategies for circularity: Km0 architecture in the Spanish Mediterranean.** OPEN HOUSE INTERNATIONAL, 2024.
- [42] TEMIZEL-SEKERYAN, S. et al. **Circular Design and Embodied Carbon in Living Buildings: The Missing Potential.** JOURNAL OF ARCHITECTURAL ENGINEERING, v. 29, n. 3, 2023.
- [43] AELENEI, L. et al. **DESIGN ISSUES FOR NET ZERO-ENERGY BUILDINGS.** OPEN HOUSE INTERNATIONAL, v. 38, n. 3, p. 7–14, 2013.
- [44] ABDELSALAM, E. et al. **An innovative design of a solar double-chimney power plant for electricity generation.** Energies, v. 14, n. 19, 2021.
- [45] ASARE, K. A. B. et al. **BIM-based LCA and energy analysis for optimised sustainable building design in Ghana.** SN APPLIED SCIENCES, v. 2, n. 11, 2020.
- [46] CAMPIOLI, A. et al. **Design strategies and LCA of alternative solutions for resilient, circular, and zero-carbon urban regeneration: A case study.** Em: Research for Development. [s.l.: s.n.]. p. 205–215.
- [47] HANSEN, R. N. et al. **Enabling rapid prediction of quantities to accelerate LCA for decision support in the early building design.** Journal of Building Engineering, v. 76, 2023.
- [48] ALSAKKA, F. et al. **Generative design for more economical and environmentally sustainable reinforced concrete structures.** JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 387, 2023.
- [49] AHMED, N. et al. **Impact of sustainable design in the construction sector on climate change.** Ain Shams Engineering Journal, v. 12, n. 2, p. 1375–1383, 2021.
- [50] AKADIRI, P. O.; CHINYIO, E. A.; OLOMOLAIYE, P. O. **Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector.** Buildings, v. 2, n. 2, p. 126–152, 2012.