XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8780

Análise bibliométrica sobre a realização da avaliação do ciclo de vida de cimentos LC3

Bibliometric analysis regarding the implementation of life cycle assessment of LC3 cements

Larissa da Silva Marques
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | larissamar.ac@gmail.com
Álan Victor da Silva Dias
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | alanvictor.dias@gmail.com
Carina Miranda Mol Santos
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | carinammol@yahoo.com.br
Yuri Sotero Bomfim Fraga
Universidade de Brasília | Brasília | Brasil | yuri.fraga@unb.br

Resumo

Este trabalho objetiva analisar o panorama da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em estudos sobre cimento de calcário e argila calcinada (LC3), por meio de uma revisão bibliométrica. A metodologia baseou-se na busca de artigos na base Scopus, utilizando combinações de palavras-chave relacionadas a LC3 e ACV, seguida de triagem e análise dos metadados com auxílio dos softwares VOSviewer e Excel e uma avaliação qualitativa dos artigos voltada para tendências, resultados e lacunas. Os resultados indicaram crescimento das publicações desde 2022, redes de colaboração de autores pouco integradas, concentração de produção científica na Ásia e Europa e predominância de estudos voltados à pegada de carbono. Foram identificadas como lacunas a baixa abordagem de impactos ambientais além do carbono e a limitada análise da sustentabilidade econômica e social. Foi verificado consenso acerca do potencial de redução dos impactos ambientais pelo LC3 para a maioria das categorias avaliadas, embora fatores locais e logísticos possam afetar esses resultados.

Palavras-chave: Cimento de calcário e argila calcinada. LC3. Avaliação de ciclo de vida. Cimento de baixo carbono. Sustentabilidade.

Abstract

This study aims to analyze the application of Life Cycle Assessment (LCA) in studies on Limestone Calcined Clay Cement (LC3) through a bibliometric review. The methodology was based on a search of articles in the Scopus database using combinations of keywords related to LC3 and LCA, followed by screening, metadata analysis using VOSviewer and Microsoft Excel and a qualitative assessment of the articles focusing on research trends, gaps and main findings. The results revealed an increase in publications since 2022, weakly integrated author collaboration networks, a concentration of scientific production in Asia and Europe, and the predominance of studies focused on carbon footprint assessment. The research gaps identified include the limited consideration of environmental impact categories beyond carbon emissions and the scarce evaluation of economic and social sustainability. The reviewed studies showed a consensus on the potential of LC3 to reduce environmental impacts in most of the impact categories evaluated, although local and logistical factors may affect these results.

Keywords: Limestone and calcined clay cement. LC3. Life cycle assessment. Low-carbon cement. Sustainability.

Como citar:
MARQUES, L. da S.; DIAS, A. V. da S.; SANTOS, C. M. M.; FRAGA, Y. S. B. Análise bibliométrica sobre a realização da Avaliação de Ciclo de Vida de cimentos LC3. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8780

INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é considerada uma das maiores emissoras de CO_2 na atmosfera, devido, principalmente, ao processo de produção do clínquer. No Brasil, as emissões do setor de cimento são responsáveis por apenas 2,3% das emissões nacionais, enquanto no restante do mundo o mesmo setor é responsável por cerca de 8% [1-2].

Diante dessa problemática das elevadas emissões de CO_2 na produção do cimento, diversas estratégias de redução das emissões de carbono vêm sendo estudadas na indústria cimenteira em todo o mundo, principalmente baseadas na metodologia dos 5Cs: Clínquer, Cimento, Concreto, Construção e (re)Carbonatação. Essa metodologia consiste em uma abordagem estratégica que permite mapear, classificar e desenvolver tecnologias sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva da indústria cimenteira, onde cada "C" representa uma etapa da cadeia produtiva do cimento com alto potencial de redução das emissões [3-4].

Quanto ao "C" referente à redução do fator clínquer na formulação do ligante (o cimento), várias pesquisas têm mostrado que a utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) em misturas cimentícias apresenta possibilidades de melhoria do desempenho ambiental, com aumento ou manutenção do desempenho mecânico em comparação com o Cimento Portland Comum (CPC) [3-5]. Os MCS utilizados como substitutos parciais do cimento em misturas cimentícias podem melhorar as propriedades do concreto, além de reduzir os seus custos e impactos ambientais.

Alguns dos MCS que vêm sendo pesquisados ao redor do mundo são: cinza da casca de arroz, cinzas de bambu, argila calcinada, bem como, misturas de MCSs, e, em vários lugares do mundo tem sido estudada a utilização de uma mistura ternária de Cimento de Calcário e Argila Calcinada (LC3) [5-8]. O LC3 é resultado da substituição de 50% do clínquer por 30% de fíler calcário, 15% de argila calcinada e 5% de sulfato de cálcio e tem se mostrado uma excelente opção como cimento de baixo carbono. A relação sinergética entre o efeito fíler do calcário e da reação pozolânica da argila calcinada compensam a perda da capacidade resistente percebida pela diminuição do teor de clínquer, dessa forma o LC3 mantém boa competitividade comercial com relação aos cimentos comuns [7-9].

Uma das principais vantagens de se utilizar o LC3, além da redução da pegada de carbono, ocasionada pela redução do teor de clínquer no cimento, é a possibilidade da utilização de argilas com baixo teor de caulinita, que são atualmente consideradas como resíduos de outras indústrias, diminuindo, assim, a abertura de novas jazidas e o esgotamento dos solos. Por conta dessas características, o interesse científico neste material tem sido intensificado em todo o mundo, inclusive no Brasil [10-11].

Em território brasileiro, já é regulamentado um tipo de cimento com composição semelhante ao LC3. A norma brasileira de cimentos ABNT NBR 16697:2018 define os limites da composição do cimento CP-IV, com quantidades de clínquer mais sulfato de cálcio entre 45% e 85%, sendo o restante composto de materiais cimentícios suplementares, os quais incluem materiais pozolânicos, como as argilas calcinadas,

com proporção entre 15% e 50%, e material carbonático, como o calcário, entre 0 e 10% [12].

Neste cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como ferramenta de avaliação do desempenho ambiental, possibilitando a verificação de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos [13-14]. A utilização da ACV permite a quantificação de entradas e saídas de materiais, energias e emissões dentro de um processo de produto, o que permite a identificação de potenciais lacunas para a mitigação de impacto ambiental [13, 15].

O uso de LC3 é relevante nos debates sobre sustentabilidade no setor de cimento e entender os ganhos ambientais, com a utilização de ferramentas de avaliação ambiental disponíveis, possibilita uma melhor compreensão do real impacto desse produto na indústria cimenteira. Para entender a relevância dessa temática no meio acadêmico, a revisão bibliométrica constitui-se uma ferramenta importante para identificar tendências de pesquisa, redes de colaboração e identificar lacunas do conhecimento. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo fornecer um panorama da utilização da ACV na avaliação de soluções baseadas no uso do LC3, por meio de uma revisão bibliométrica.

METODOLOGIA

Para a etapa de identificação dos artigos a serem analisados na revisão bibliométrica foi utilizada a base de dados Scopus. A busca foi realizada no dia 9 de abril de 2026. Aplicou-se as palavras-chave apontadas na Figura 1 a títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. Os tipos de documentos foram limitados a artigos. Não foi realizada restrição temporal. A *string* de busca resultante é mostrada na Figura 1.

A triagem, conforme critérios de inclusão e exclusão apresentados na Figura 1, foi realizada com a leitura dos títulos e resumos dos artigos, e, quando isso foi insuficiente para identificar os critérios, analisou-se, também, o conteúdo do artigo.

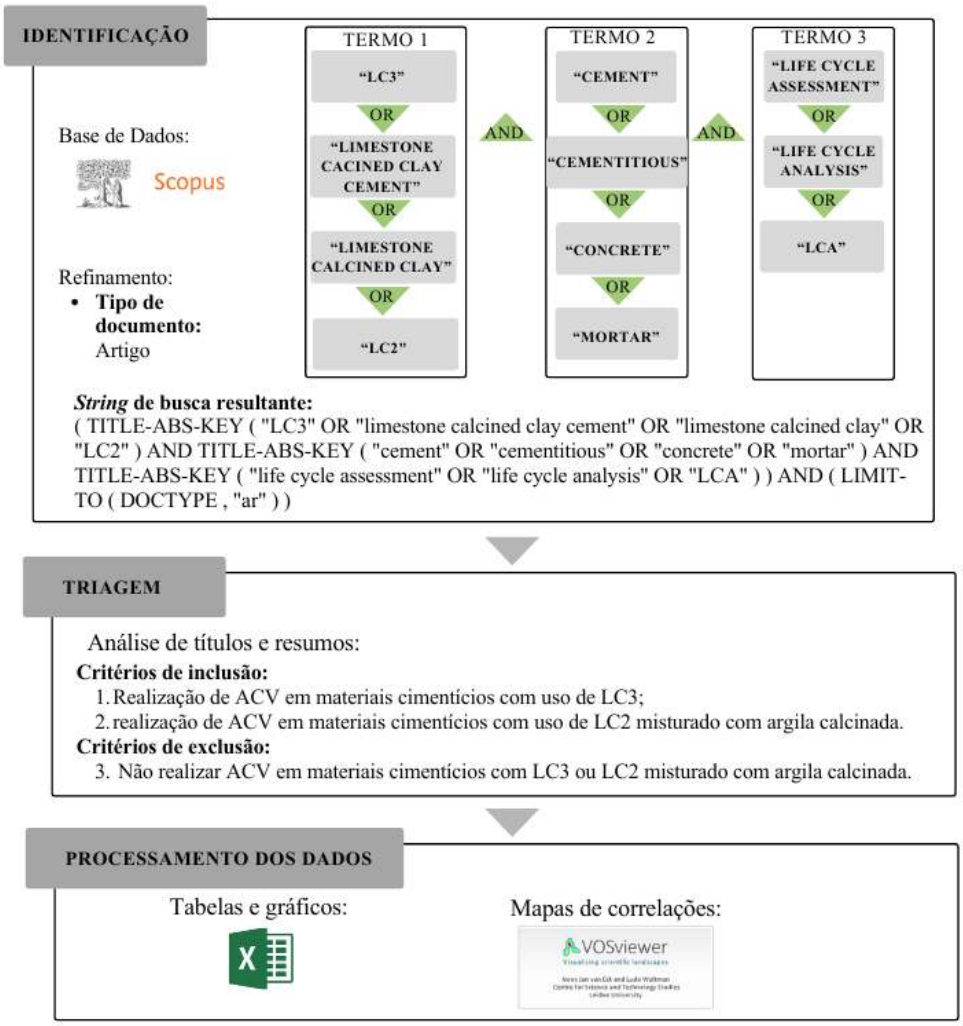
Os metadados dos artigos selecionados foram extraídos no formato CSV, e analisados com o auxílio dos *softwares* Excel, para elaboração de tabelas e gráficos, e VOSviewer, para a produção dos mapas de correlações.

Foram analisados o número de artigos publicados sobre o assunto em cada ano, ou seja, a evolução temporal e a frequência de publicações, além disso, as ocorrências e as correlações entre os autores, os países de origem dos autores, e, as palavras-chave. Ao final, foi realizada uma avaliação qualitativa dos artigos para apontar tendências, resultados e lacunas.

A Figura 1 sintetiza as etapas metodológicas realizadas nesta pesquisa de revisão bibliométrica.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8780

Figura 1: Metodologia da pesquisa



Fonte: o autor.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca na base de dados retornou 58 artigos. Após a triagem, conforme os critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 57 artigos para a revisão. A análise dos dados de publicações anuais, por autor e por país, e, palavras-chave, desses 57 artigos, estão apresentadas a seguir.

EVOLUÇÃO TEMPORAL E RELEVÂNCIA DO TEMA

A Figura 2 mostra a distribuição anual das publicações, evidenciando a tendência acerca da relevância do tema.

Figura 2: Número de publicações por ano



Fonte: o autor.

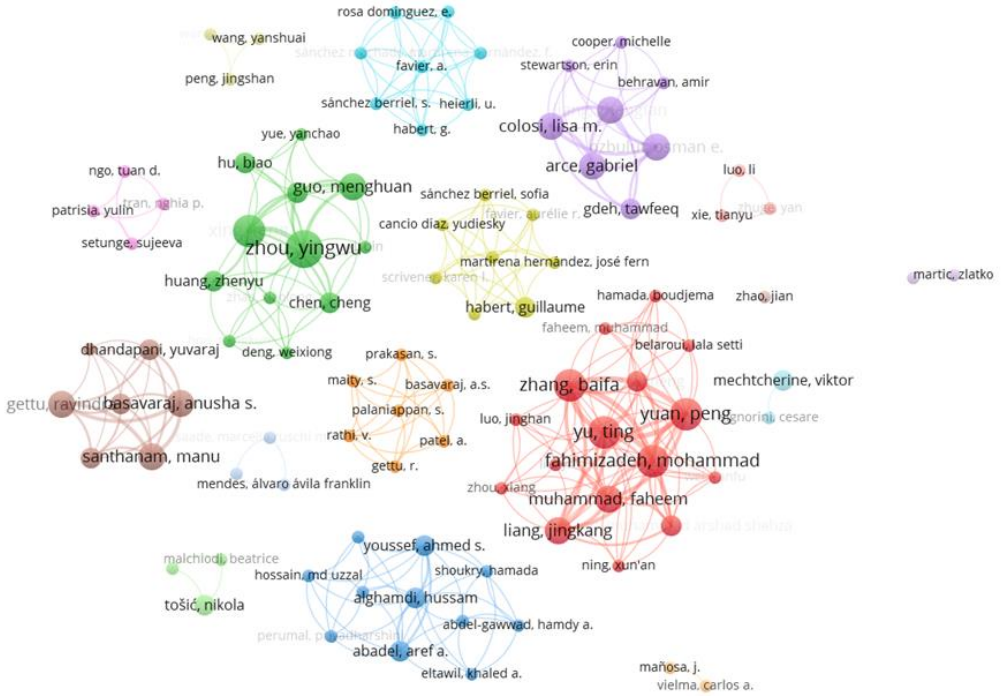
Percebe-se, a partir da Figura 2, que as publicações sobre o tema do escopo deste artigo iniciaram em 2015 na Scopus, ou seja, 11 anos atrás. O número de publicações de 2015 a 2021 foi praticamente constante, com 1 artigo publicado por ano, excetuando-se 2019, com 2 publicações, e 2020, com 0 publicações, logo, o número médio de publicações nesse período foi de 1 artigo por ano. A partir de 2022 começa o crescimento do número de publicações, seguindo o crescimento das pesquisas sobre LC3 [11], com crescimento quase linear de aproximadamente 3 artigos por ano até 2024, acentuando-se esse crescimento em 2025, com um total de 19 artigos publicados sobre o assunto, 8 artigos a mais que no ano anterior. Isso mostra o aumento do interesse científico sobre o tema, apesar de ainda estar em desenvolvimento, com relevância incipiente.

Em 2026, o número de publicações é inferior ao observado em 2025. No entanto, destaca-se que esta análise foi realizada apenas com base no primeiro quadrimestre de 2026, não contemplando, portanto, a totalidade das publicações do ano. Ainda assim, o fato de já haver artigos publicados nesse período, alcançando praticamente metade do volume registrado em 2025 em apenas um quarto do ano, sugere que o interesse pelo tema se mantém e pode, inclusive, apresentar tendência de crescimento.

AUTORES

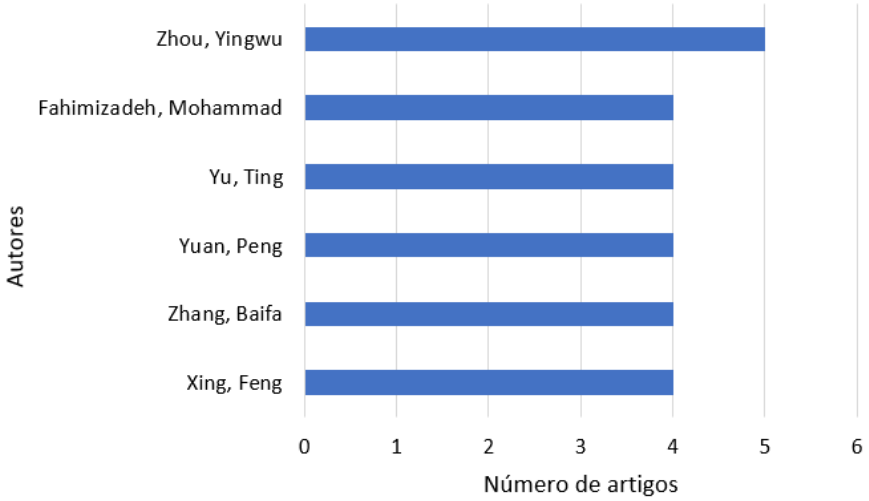
A Figura 3 mostra as redes colaborativas existentes entre diferentes autores dos artigos e a Figura 4 destaca os principais autores.

Figura 3: Redes colaborativas de autores



Fonte: o autor.

Figura 4: Ranking dos autores com maior número de artigos publicados da *string* do artigo



Fonte: o autor.

Verifica-se, na Figura 3, cerca de 16 redes colaborativas praticamente independentes entre si. Dentre essas redes, as mais relevantes estão representadas nas cores verde e vermelha, no qual os círculos que representam cada autor são maiores em comparação aos demais, visto que o tamanho das esferas se relaciona com o número de artigos publicados, além de que os autores que aparecem na Figura 4 são desses grupos.

Observou-se, a partir da Figura 4, que Zhou, Yingwu apresentou o maior número de publicações dentro do conjunto analisado. No entanto, devido ao número reduzido de estudos disponíveis sobre a avaliação do ciclo de vida do cimento LC3 (57 artigos), bem como a pequena diferença do número de publicações entre os autores, em geral,

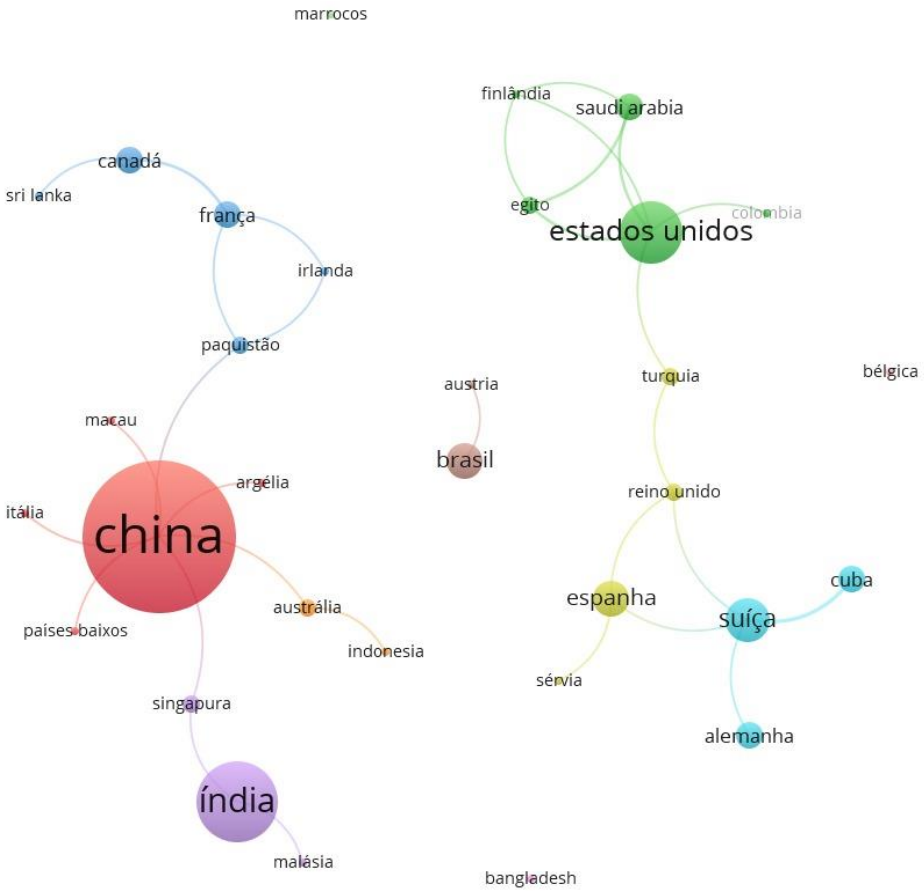
variando em apenas uma unidade, não é possível estabelecer uma hierarquia clara de produtividade ou influência entre os pesquisadores. Dessa forma, os autores identificados devem ser compreendidos como os principais contribuintes iniciais da temática, ainda em consolidação. Esse comportamento reforça o caráter emergente do tema, conforme indicado na análise da Figura 2.

O fato de haver dezenas de autores com pequeno número de publicações por autor evidencia que as pesquisas sobre ACV de LC3 são pulverizadas e sem uma consolidação do núcleo científico sobre o tema, o que pode dificultar a construção da robustez do tema. Nesse sentido, pode ser vantajoso para a comunidade científica haver conexões entre as 16 redes, bem como, com grupos de pesquisa sobre LC3 que ainda não realizam ACV, principalmente no cenário vivido mundialmente onde a crise climática acentua a busca por medidas de redução das emissões de carbono. Para estabelecer possibilidades dessas conexões que favoreçam os grupos, sugere-se a realização de pesquisas de revisão do estado da arte relacionando o conteúdo desses artigos.

PAÍSES

A Figuras 5 mostra os países de origem de todos os autores de todos os artigos selecionados para a análise.

Figura 5: Redes colaborativas entre países



Fonte: o autor.

Foram identificados 32 países. A maioria dos países são europeus, correspondendo a 38%. Percentual semelhante é verificado para os países asiáticos, 34%. Quanto aos demais continentes, 16% dos países são das Américas (do Sul, Central e do Norte), 9% da África e 3% da Oceania. A colaboração internacional ficou dividida em 2 grandes grupos e 1 parceria entre dois países. Três países de diferentes continentes aparecem isolados.

Um dos grandes grupos é composto majoritariamente por países da Ásia (8 países) e possui um total de 15 países no grupo. O outro grande grupo tem, em sua maioria, países da Europa (6 países), totalizando, neste, 12 países.

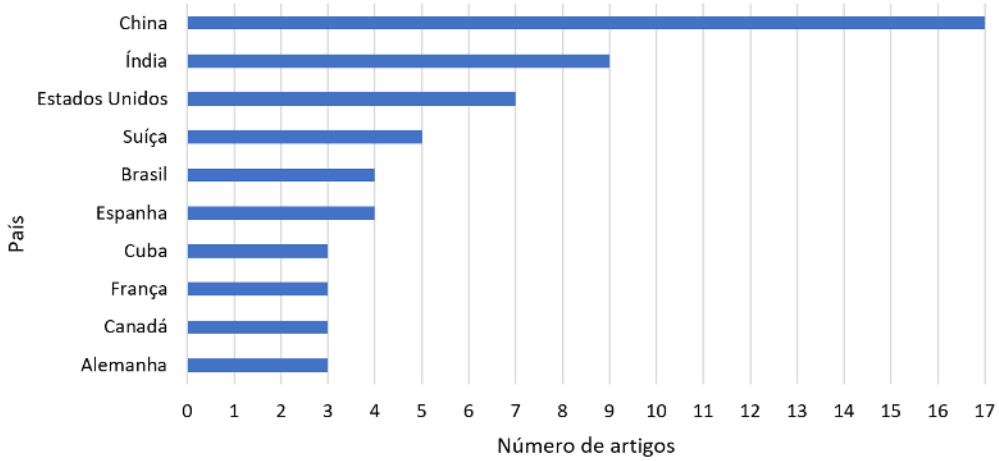
Os países da América do Sul não estão no mesmo grupo colaborativo, assim como os países da América do Norte. Seria vantajoso para a comunidade acadêmica que houvesse essa colaboração, para explorar os potenciais das regiões.

Países com as mesmas cores seriam grupos que possuem conexões mais fortes entre si do que com os demais, de outras cores. Isso mostra que mesmo dentro dos grandes grupos existem outros grupos de relações mais fortes.

A China é o país de origem da maioria dos autores, seguido pela Índia, que está na mesma rede colaborativa que a China, e os Estados Unidos, que está em outra rede colaborativa e é o país mais relevante no seu grupo. A Suíça também possui destaque no grupo a que pertencem os Estados Unidos. Esses países aparecem nesta mesma ordem como os 4 países com maiores números de publicações no ranking da Figura 6, que mostra o número de artigos publicados pelos 10 países mais produtivos. Esses países são os mesmos que se destacam em publicações sobre LC3, apesar de que em ordem diferente [11], já quanto a ACV, dentre esses, apenas Estados Unidos e China se destacam [17].

A China, a Índia e os Estados Unidos estão entre os 5 maiores produtores de cimento do mundo, o que pode ser uma motivação para a realização de pesquisas sobre um cimento de baixo carbono, como o LC3 [16]. Enquanto isso, a Agência Suíça para o Desenvolvimento e Cooperação (SDC) constitui-se na principal financiadora de pesquisas sobre LC3, contribuindo através do Projeto LC 3 - Cimento de Baixo Carbono, de colaboração internacional, para a divulgação e o desenvolvimento do LC3, tendo como cooperação mais relevante nesse projeto a parceria entre Suíça, Cuba e Índia [11].

Figura 6: Ranking dos 10 países com maiores produtividades quanto a números de artigos publicados



Fonte: o autor.

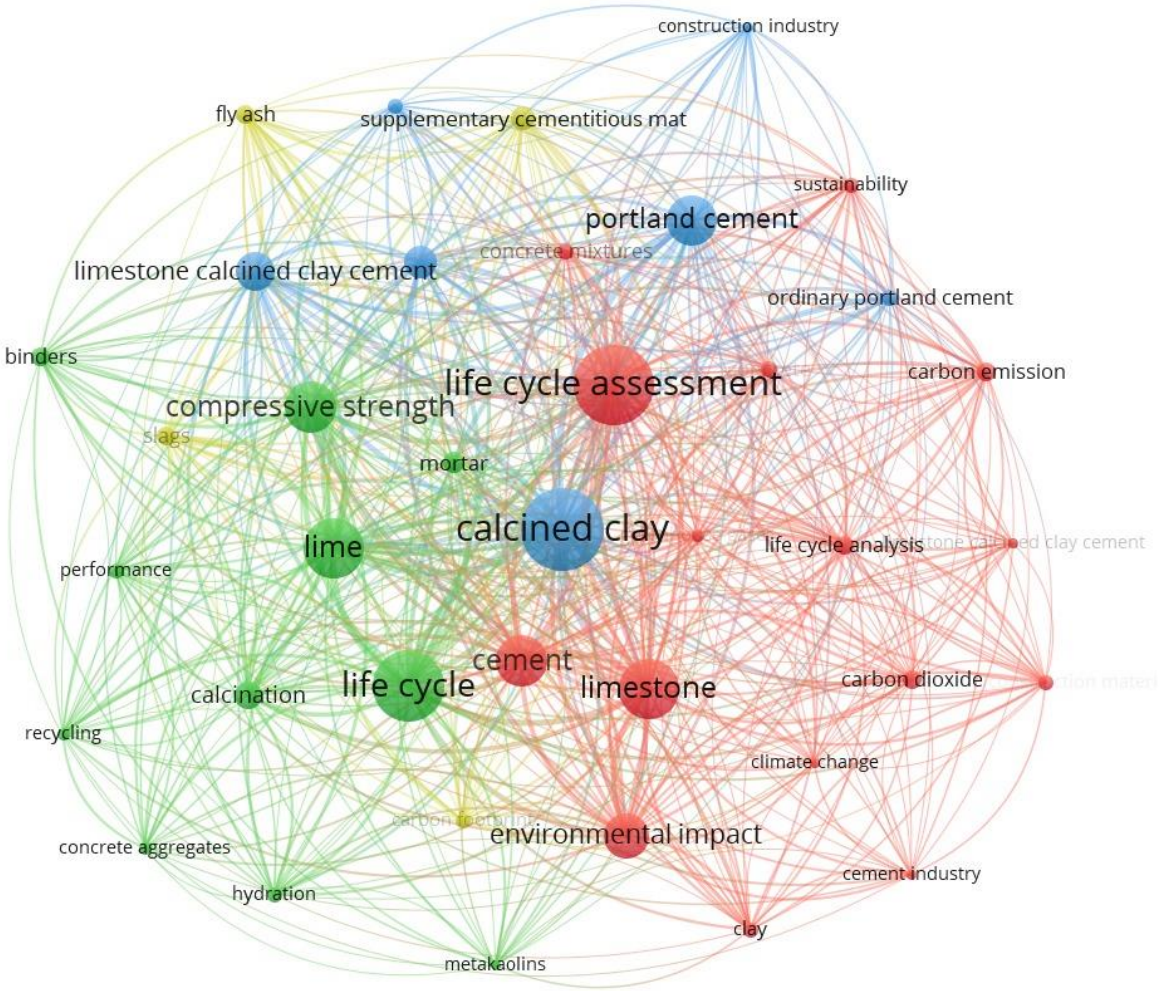
O Brasil não está incluído nos grandes grupos, relacionando-se apenas com a Áustria. Nessa interação o Brasil tem maior destaque que a Áustria em relação ao número de publicações, apesar disso, o número de publicações é de apenas 4 artigos, conforme a Figura 6.

Muitas pesquisas brasileiras utilizam cimento de Calcário e Argila Calcinada sem utilizar a designação de LC3, já que no país há uma normalização que permite até 50% de adição de argila calcinada e até 10% de material carbonático no cimento Portland tipo CP IV. Nesse contexto, destaca-se que a ausência da nomenclatura LC3 pode levar ao subdimensionamento do número de publicações brasileiras sobre o tema em análises bibliométricas, já que estudos com composições equivalentes podem não ser identificados por estratégias de busca baseadas exclusivamente nessa terminologia.

ANÁLISE DE PALAVRAS-CHAVE

As palavras-chave revelam os assuntos principais tratados nos artigos. A Figura 7 mostra as correlações entre as 38 palavras-chave que se repetiram pelo menos 5 vezes entre os artigos.

Figura 7: Cluster de palavras-chave



Fonte: o autor.

Na realização da correlação entre as palavras formaram-se 4 clusters, os quais foram identificados e nomeados de acordo com suas principais temáticas.

O cluster azul, “Cimento Portland e cimento LC3”, cita o cimento Portland, o cimento LC3, os MCS adicionados ao cimento Portland para a obtenção do LC3 e a principal indústria que eles influenciam, a indústria da construção civil. Isso evidencia o interesse dessa indústria pelo uso de MCS, inclusive, o uso de LC3.

O cluster vermelho, “Cimento e a questão ambiental”, está centrado na ACV e nos impactos climáticos do cimento. Neste cluster, a ênfase das palavras relacionadas à questão ambiental está na pegada de carbono. Nota-se a ausência de palavras-chaves associadas aos demais impactos ambientais, como esgotamento de recursos naturais. Outros aspectos da sustentabilidade, como a avaliação econômica e social não foram identificados, embora a Análise de Ciclo de Vida também esteja na *string* de busca, visto que este termo abrange esses outros aspectos, além do ambiental, que é o foco da ACV.

O cluster amarelo, “MCSs”, aborda substitutos do clínquer no cimento que não os utilizados no LC3, indicando que outros MCS além da argila calcinada e do calcário

também são relevantes na questão ambiental no contexto da produção do cimento e que a cinza volante e escória vêm sendo pesquisadas em conjunto com o LC3.

O cluster verde, “Desempenho mecânico dos materiais cimentícios”, está associado aos fatores que afetam as propriedades mecânicas do concreto e das argamassas, evidenciando, ainda, a resistência à compressão como a principal propriedade avaliada pelos artigos.

Não foi identificada a palavra “*durability*”, que é a tradução em inglês de durabilidade. A durabilidade é uma propriedade importante dos materiais cimentícios, com forte influência nos impactos ambientais.

TENDÊNCIAS, RESULTADOS E LACUNAS

A análise qualitativa dos artigos selecionados complementa os resultados bibliométricos, permitindo observar tendências recorrentes, convergências metodológicas e lacunas na aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida ao cimento LC3.

A literatura aponta consenso sobre o potencial do LC3 em reduzir os impactos ambientais do cimento Portland convencional para a maioria das categorias ambientais avaliadas nas ACVs, principalmente pela diminuição do fator clínquer, com destaque para a redução do Potencial de Aquecimento Global (GWP) e das emissões de CO_2 equivalente. Essa convergência também foi observada na análise das palavras-chave, em que termos relacionados a carbono, emissões e sustentabilidade figuraram entre os mais recorrentes.

Entretanto, a magnitude desses benefícios depende significativamente de fatores regionais e logísticos, como disponibilidade de argilas, matriz energética empregada na sua calcinação e distâncias de transporte das matérias-primas, limitando a extrapolação direta dos resultados entre diferentes regiões. Além disso, a literatura ressalta a necessidade de abordagens multicritério e da ampliação das categorias ambientais avaliadas, visto que o LC3, apesar de reduzir o GWP, pode transferir impactos para categorias como consumo de recursos fósseis, uso do solo, consumo de água e ecotoxicidade, e menos da metade dos artigos realizaram a avaliação dessas categorias.

Observou-se ainda predominância de estudos conduzidos sob a abordagem “*cradle-to-gate*”, com limitada consideração das fases de uso, manutenção e fim de vida das estruturas. Nesse contexto, a integração entre ACV e durabilidade constitui uma importante lacuna da literatura. A ausência do termo "durability" entre as palavras-chave mais frequentes corrobora a predominância de estudos voltados aos impactos da fase de produção, em detrimento do desempenho ao longo da vida útil.

Por fim, verificou-se que a maior parte das pesquisas está concentrada na dimensão ambiental da sustentabilidade, sendo ainda pouco frequentes avaliações integradas que contemplem simultaneamente aspectos ambientais, econômicos e sociais.

CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho auxiliam a organizar o campo de pesquisa emergente e ainda difuso do LC3, por meio do mapeamento da evolução temporal da relevância, redes de pesquisa e países que tratam do tema. Além disso, permite identificar as tendências e lacunas no estudo de ACV do LC3 até o primeiro terço do mês de abril de 2026.

O interesse da comunidade acadêmica pelo uso de ACV para avaliação ambiental do uso de LC3, pouco representativo até 2021, vem crescendo desde 2022, sendo mais expressivo no ano de 2025.

Verificou-se a necessidade de realizar conexões entre as redes colaborativas de autores para favorecer a consolidação da temática, já que foram identificadas 16 redes praticamente independentes entre si, sugerindo-se a realização de pesquisas de estado da arte para identificação de interconexões entre os artigos que favoreçam colaborações.

Analisando as colaborações entre os países, foram identificados dois grandes grupos e alguns países isolados. No grande grupo mais relevante, a maioria dos países é da Ásia, e no outro grande grupo, da Europa. O país com maior produtividade em termos de publicações é a China. O Brasil não está inserido nestes grandes grupos, mostrando conexões apenas com a Áustria, apesar de estar entre os 10 países com maiores números de publicações.

Quanto às palavras-chave, identificou-se lacunas de pesquisa como foco em pegada de carbono, carecendo de avaliação de outros impactos ambientais igualmente relevantes, ausência de avaliação dos pilares econômico e social da sustentabilidade e falta de associação com a durabilidade nas avaliações.

A avaliação qualitativa dos artigos realizada corroborou com as percepções obtidas a partir do mapa de co-ocorrência de palavras-chave, além de apontar consenso acerca do potencial do LC3 em reduzir os impactos ambientais para a maioria das categorias ambientais costumeiramente avaliadas em comparação ao cimento Portland convencional, apesar da ocorrência dos benefícios ambientais depender de fatores regionais e logísticos relacionados à disponibilidade de argilas, matriz energética empregada na sua calcinação e distâncias de transporte das matérias-primas. Também foi verificada a necessidade de avaliações multicritério e ampliação das categorias ambientais avaliadas.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND (ABCP). **Roadmap Net Zero da Indústria do Cimento Brasileira**. São Paulo, 2025.

[2] ANDREW, R. M.. (2019). Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, v11. doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019.

[3] PROGRAMA IBERO-AMERICANO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO (CYTED). **Portfólio Tecnológico RINCIMCI 2025**. Madrid, 2025.

[4] THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU). **Cementing the European Green Deal: the 5Cs, Reaching Climate Neutrality Along the Cement and Concrete Value ChainBy 2050**. Bruxelas, 2020.

[5] MOHAMMADI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. M.. (2023). Investigating the environmental and economic impacts of using supplementary cementitious materials (SCMs) using the life cycle approach. **Journal of Building Engineering**, 79, 2023. doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107934.

[6] NADAHIRWA, D.; ZMAMOU, H., LENORMAND, H.; LEBLANC, N.. (2022). **Cleaner Materials**, V5. doi.org/10.1016/j.clema.2022.100123.

[7] RIBEIRO, F. R. C.; RUVIARO, A. S.; DE MATOS, P. R.; KIRCHHEIM, A. P.. (2025). Impact of different superplasticizers on hydration, rheology, mechanical strength, and environmental evaluation of LC3 cements. **Case Studies in Construction Materials**. Volume 23, e05347, 2025.

[8] DÍAZ, Y. C.; BERRIEL, S. S.; HEIERLI, U.; FAVIER, A.R.; MACHADO, I. R. S.; SCRIVENER, K. L.; HERNÁNDEZ, J. F. M.; HABERT, G.. (2017). Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. **Development Engineering**, v. 2. doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001.

[9] MALACARNE, C. S.; DA SILVA, M. R. C; DANIELI, S.; MACIEL, V. G.; KIRCHHEIM, A. P.. (2021). Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125261.

[10] THE MATERIAL. **Limestone Calcined Clay Cement**. 2026. Disponível em: lc3.ch/the-material. Acesso em: 18 abr. 2026.

[11] MAÑOSA, J.; CALDERÓN, A. PIZARRO, R. S.; ALAMEDA, A. M.; CHIMENOS, J. M. Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder – A comprehensive overview. **Heliyon**, v10. 2024. doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25117.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697:2018**: Cimentos Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

[13] OLIVEIRA, J. A.; SILVA, D. A. L.; PUGLIERI, F. N.; SAAVEDRA, Y. M. B.. **Engenharia e gestão do ciclo de vida de produtos: teoria e prática**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2024. ISBN 978-8550821092.

[14] PARECE, S.; RESENDE, R.; RATO, V.. (2025). BIM-based life cycle assessment: A systematic review on automation and decision-making during design. **Building and Environment**, v282. doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113248.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044:2025**: Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2025.

[16] U.S. Geological Survey (USGS). Mineral Commodity Summaries 2025. Reston, VA. 2025. 212 p. ISBN 978-1-4113-4595-9. 10.3133/mcs2025.

[17] MOUTIK, B.; SUMMERSCALES, J.; GRAHAM-JONES, J.; PEMBERTON, R. Life cycle assessment research trends and implications: a bibliometric analysis. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13408, 2023. https://doi.org/ 10.3390/su151813408.