

Incorporação de escória de aciaria em matrizes cimentícias: uma análise bibliométrica (2000-2025)

Incorporation of steel slides in cement matrices: a bibliographic analysis (2000-2025)

Carlos Eduardo Machado de Oliveira¹

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo realizar uma análise cienciométrica da produção científica sobre a incorporação da escória de aciaria em matrizes cimentícias, abrangendo publicações de 2000 a 2025. Para isso, foram utilizados dados da base Scopus, analisados com RStudio (Bibliometrix) e VOSviewer, permitindo identificar a evolução temporal das publicações, os principais periódicos, autores e países, bem como mapear tendências de pesquisa, padrões de colaboração e lacunas existentes na área. A análise revelou um total de 1.601 artigos publicados em 368 periódicos distintos, sendo China, Índia, Estados Unidos, Coreia do Sul e Itália os principais países contribuidores, responsáveis por aproximadamente 72,77% dos documentos. Os periódicos mais influentes e com maior número de publicações foram Construction and Building Materials, Materials, Journal of Building Engineering, Journal of Cleaner Production e Case Studies in Construction Materials. Entre os autores mais proeminentes nessa área destacam-se Wen Ni, Shaopeng Wu, Jiaxiang Liu, Wang Qiang e Ricardo A. F. Peixoto.

Palavras-chave: Escória de aciaria. Matriz cimentícias. Concreto sustentável. Análise Bibliométrica. Scopus.

ABSTRACT

The present article aims to conduct a scientometric analysis of the scientific production on the incorporation of steelmaking slag into cementitious matrices, covering publications from 2000 to 2025. For this purpose, data from the Scopus database were used and analyzed using RStudio (Bibliometrix) and VOSviewer, enabling the identification of the temporal evolution of publications, the main journals, authors, and countries, as well as the mapping of research trends, collaboration patterns, and existing research gaps in the field. The analysis revealed a total of 1,601 articles published in 368 distinct journals, with China, India, the United States, South Korea, and Italy being the main contributing countries, accounting for approximately 72.77% of the documents. The most influential journals with the highest number of publications were Construction and Building Materials, Materials, Journal of Building Engineering, Journal of Cleaner Production, and Case Studies in Construction Materials. Among the most prominent authors in this research area are Wen Ni, Shaopeng Wu, Jiaxiang Liu, Wang Qiang, and Ricardo A. F. Peixoto.

Keywords: Steelmaking slag. Cementitious matrices. Sustainable concrete. Bibliometric analysis. Scopus.

¹ Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão – campus Bacabal – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8870-6937> – E-mail: edu.machad4@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do cimento contribui diretamente para a emissão de gases do efeito estufa (GEE), sendo responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), o que corresponde a quase 0,9 toneladas de CO₂ liberadas por tonelada de cimento produzido (Al-Luhybi *et al.*, 2025; Ige *et al.*, 2024; Meijssen *et al.*, 2329024). Aliado a isso, o setor da construção civil apresenta um elevado consumo de materiais naturais, especialmente agregados minerais (britas e areias), cuja extração global ultrapassa os 50 bilhões de toneladas anuais (Bertoldo *et al.*, 2024; Martínez-García *et al.*, 2019), gerando impactos ambientais negativos, como a degradação de ecossistemas aquáticos e terrestres, e esgotamento dos recursos naturais (Behera *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2025).

Como resultado, o setor da construção civil passou a se preocupar com os impactos ambientais e, conseqüentemente, a se esforçar para reduzir sua pegada de carbono e do consumo de recursos naturais (Amarasinghe *et al.*, 2024; Mosly, 2025). Diante disso, o crescente interesse em práticas sustentáveis no setor da construção civil tem chamado atenção para a utilização de resíduos como uma estratégia eficaz para minimizar impactos ambientais e promover uma gestão eficiente de resíduos (Gavela *et al.*, 2025).

Entre as alternativas mais promissoras, a incorporação de resíduos em argamassas e concretos tem se mostrado uma solução viável para reduzir a dependência de agregados naturais e, simultaneamente, proporcionar propriedades funcionais aprimoradas aos materiais e um descarte ambientalmente adequado desses resíduos (Bertoldo *et al.*, 2024). Nesse contexto, destaca-se a escória de aciaria, um resíduo amplamente gerado na indústria siderúrgica e que se apresenta como material de grande potencial para aplicação em matrizes cimentícias, em função de sua composição química e física (Cai *et al.*, 2024; Xue *et al.*, 2016).

Diante disso, diversos estudos têm investigado a utilização de escoria de aciaria em compósitos cimentícios, destacando os impactos nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos materiais. Pesquisadores demonstraram que a utilização da escoria como substituto parcial do cimento ou dos agregados naturais resultaram em ganhos de resistências à compressão e melhoria na durabilidade frente à carbonatação e à penetração de agentes agressivos (Wei *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2016). Outros estudos analisaram a influência da escoria na microestrutura de materiais cimentícios, indicando a formação de

matrizes mais densas e com menor porosidade quando utilizados teores otimizados do resíduo (Zhang *et al.*, 2022).

Paralelamente, revisões recentes consolidaram o estado da arte sobre o uso da escória de aciaria em materiais cimentícios, discutindo seu desempenho mecânico, comportamento em ambientes agressivos e limitações técnicas, como a instabilidade volumétrica e a variabilidade composicional (Ali e Astuti, 2025; Cai *et al.*, 2024).

Embora essas revisões forneçam uma base técnica consistente, ainda são escassos estudos que adotem uma abordagem bibliométrica para mapear de forma sistemática a evolução da produção científica, as tendências de pesquisa e as lacunas existentes sobre a incorporação da escória de aciaria em matrizes cimentícias.

A análise bibliométrica constitui uma abordagem estatística aplicada à literatura científica, permitindo identificar os países que mais publicam, periódicos e autores mais influentes, relações de cooperações entre autores, redes de citações e de palavras-chaves, tópicos relevantes em determinada área de pesquisa (Cui *et al.*, 2022; Öztürk *et al.*, 2024; Passas, 2024).

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma análise bibliométrica da produção científica relacionada à incorporação da escória de aciaria em matrizes cimentícias, visando identificar a evolução temporal das publicações, os principais periódicos, autores e países envolvidos, bem como as tendências de pesquisa e lacunas do conhecimento existentes na área.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo de revisão visa avaliar os aspectos quantitativos da literatura científica conduzida ao longo das últimas duas décadas sobre compósitos cimentícios com escoria de aciaria utilizando de análise bibliométrica. A base de dados Scopus foi selecionada como fonte primária de dados devido à sua abrangente cobertura da literatura científica e ao amplo número de periódicos indexados, o que assegura maior representatividade e confiabilidade dos resultados (Matsimbe *et al.*, 2022; Room e Bahadori-Jahromi, 2024). O processo metodológico adotado está ilustrado na Figura 1.

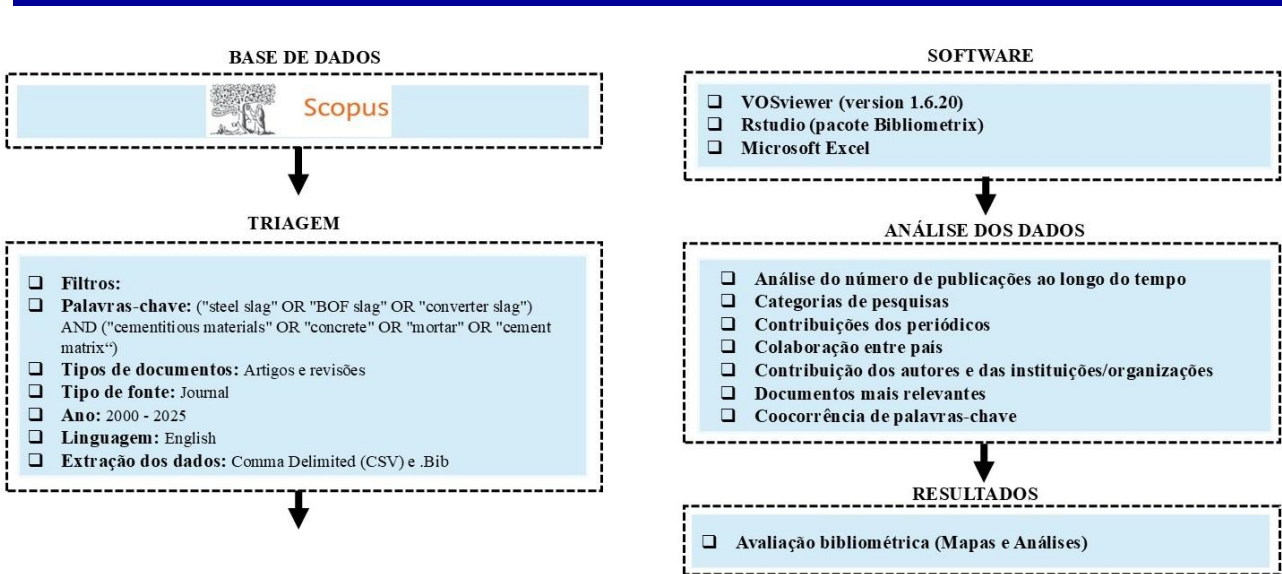


Figura 1. Esquema de coleta de artigos e fluxograma da estrutura da pesquisa

Com a base de dados escolhida, os artigos foram selecionados com a combinação de palavras-chave como "steel slag", "BOF slag", "converter slag", "cementitious materials", "concrete", "mortar", "cement matrix" para garantir uma ampla cobertura do cenário de pesquisa. A aplicação do comando de busca booleano ("steel slag" OR "BOF slag" OR "converter slag") AND ("cementitious materials" OR "concrete" OR "mortar" OR "cement matrix") no banco de dados resultou em 2.447 documentos. Vários filtros, conforme Tabela 1, foram aplicados para filtrar os documentos desnecessários e, após a triagem, o número de documentos reduziu para 1.602. Após a leitura do título e palavras-chave foram removido um artigo duplicado, o que totalizou 1.601 artigos selecionados para as análises. Os dados foram coletados em 09 de outubro de 2025.

Tabela 1. Filtros de mineração de dados da base de dados Scopus.

Tipo de dados	Filtros	Tipo de dados	Filtros
Tipo de documento		Artigo e revisão	
Data de publicação		2000 – 2025	
Idioma		Inglês	
Tipo de fonte		Revista	

Os dados obtidos e refinados da base de dados Scopus foram extraídos no formato Excel delimitado por virgulas (CSV) (Faisal *et al.*, 2025; Room e Bahadori-Jahromi, 2024). Usando esses artigos, o software VOSviewer (version 1.6.20), o Rstudio (pacote Bibliometrix) e o Microsoft Excel foram usados para a realização da análise bibliométrica e processamento dos dados.

O Microsoft Excel foi utilizado para filtrar e organizar o conjunto de dados. O RStudio Bibliometrix foi usado para analisar os dados, gerando gráficos e tabelas detalhadas para identificar padrões de pesquisas (Guleria e Kaur, 2017; Ramadhan *et al.*, 2024; Tripathy, Jena e Mishra, 2024; Yıldız e Karakuş Yılmaz, 2024). Por meio desse software foi criado as redes de citações, mapas de coocorrência e visualizações de tendências temáticas. Bem como também, foi empregado para produzir gráficos de três campos, nuvens de palavras e tópicos de tendência. Já o software VOSviewer foi usado especificamente para construir e visualizar rede de colaborações internacionais entre os países (Donthu *et al.*, 2021; Eck, van e Waltman, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Visão geral da literatura

A análise bibliométrica referente aos compósitos com escórias de aciaria, realizada com dados da base Scopus no período de 2000 a 2025, identificou 1.601 artigos publicados em 368 periódicos diferentes (Tabela 2). A maiorias dos documentos selecionados são publicações de artigos, correspondendo a 94,38% do total de documentos. O segundo tipo de documento são artigos de revisões, representando 5,62%.

Tabela 2. Síntese das informações obtidas pela análise de dados no Biblioshiny	
Descrição	Resultados
INFORMAÇÕES PRINCIPAIS SOBRE OS DADOS	
Período	2000:2025
Fontes	368
Documentos	1601
Taxa de crescimento anual (%)	21,98%
Idade média dos documentos (ano)	3,97
Média de citações por documento	30,15
Referências	9.736
CONTEÚDO DOS DOCUMENTOS	
Palavras-chave Plus (ID)	6960
Palavras-chave do autor (DE)	3617
AUTORES	
Autores	4757
Autores de documentos com um único autor	35
COLABORAÇÃO ENTRE AUTORES	
Documentos com um único autor	41
Coautores por documento	4,54
Coautoria internacional %	19,49
TIPOS DE DOCUMENTOS	
Artigo	1511

Apesar dos documentos examinados terem sido publicados nas últimas duas décadas, a idade média dos documentos é de 3,97 anos, o que, em combinação com a taxa média anual de crescimento de 21,98%, destaca a importância e o interesse recente no uso de escória de aciaria em compósitos cimentícios. Um total de 4757 autores contribuíram para a produção dos documentos recuperados. Cada documento apresentou uma média de 30,15 citações e foi produzido em média por 4,54 coautores. Além disso, foram identificados 41 documentos (2,55%) produzidos por um único autor (Tabela 2)

3.2 Análise do número de publicações ao longo do tempo

O A Figura 2 (A) apresenta a evolução do interesse científico em matriz cimentícias com escória de aciaria, evidenciando um crescimento expressivo no número de publicações de 2000 a 2025. Esse aumento reflete a ampliação do interesse da comunidade científica e a relevância crescente dos estudos voltados ao desenvolvimento de materiais cimentícios alternativos e sustentáveis.

Observou-se que o número de publicações e interesse pelo assunto pode ser dividido em três fases distintas. A primeira fase (2000-2008) caracteriza-se por uma produção científica em estágio inicial, com números reduzidos de trabalhos e baixo ritmo de crescimento, correspondendo a 1,37 % das publicações. A segunda fase (2009-2018) corresponde a um período de crescimento constante, concentrando cerca de 19,97% das publicações, com aumento gradativo de publicações e ampliação do interesse acadêmico, possivelmente impulsionado pelos primeiros resultados promissores quanto ao desempenho técnico e ambiental da escória de aciaria em matrizes cimentícias. Por fim, a terceira fase (2019 – 2024) evidencia um crescimento acelerado e exponencial do número de estudos, correspondendo a cerca de 78,65% das publicações totais e atingindo o pico de 284 publicações em 2025.

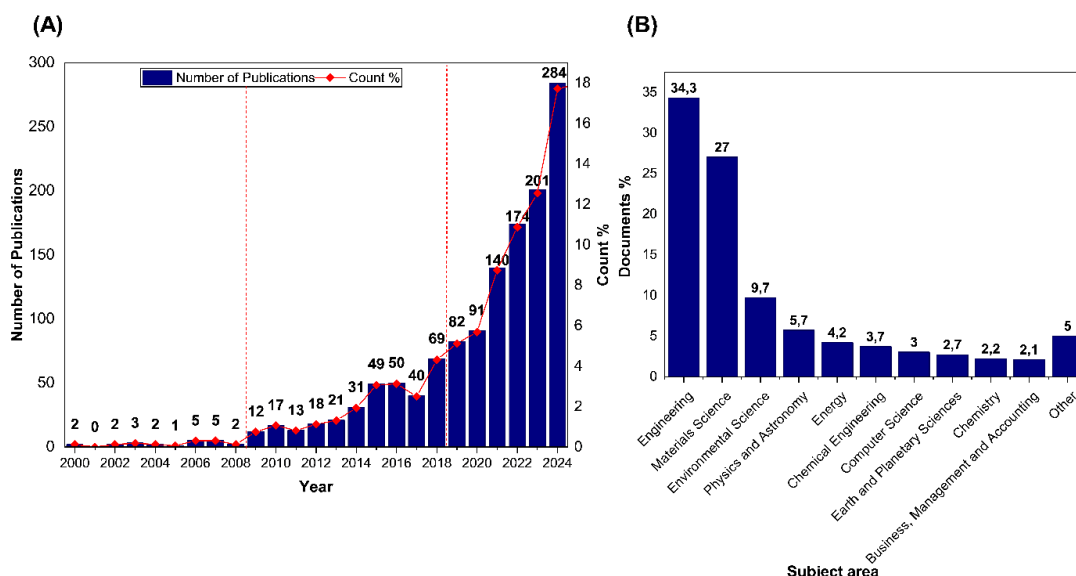


Figura 2. Evolução das publicações sobre escória de aciaria em matrizes cimentícias: (A) publicações por ano; (B) distribuição por áreas temáticas.

A análise da distribuição das publicações por área de conhecimento, referentes à aplicação de escorias de aciaria em matrizes cimentícias, abrange 21 categorias principais reconhecidas pela base de dados Scopus, evidenciando sua natureza interdisciplinar, conforme pode ser observado na Figura 2 (B). As áreas de engineering, materials science, environmental science, physics and astronomy e energy destacam-se como as cinco principais, contribuindo com 34,3%, 27,0%, 9,7%, 5,7% e 4,2% dos documentos, respectivamente, conforme apresentado na Figura 2 (B).

3.3 Publicação por País

A Figura 3 ilustra a distribuição global da produção científica por países sobre escoria de aciaria em matriz cimentícia. No mapa do calor, é possível observar que todos os continentes têm representação em maior ou menor grau, além disso, é possível perceber que 79 países contribuíram com pelo menos uma publicação. Dentre os diferentes países, a China, a Índia, os United States, a South Korea, a Italy e, destacam-se como os principais contribuintes em termos de publicações, com aproximadamente 72,77% dos documentos publicados. A China tem o maior número de publicação, apresentam 822 documentos publicado, correspondendo a cerca de 51,34% do total de publicações, seguida pela Índia, com 176 artigos, o que corresponde a aproximadamente 11% das publicações.

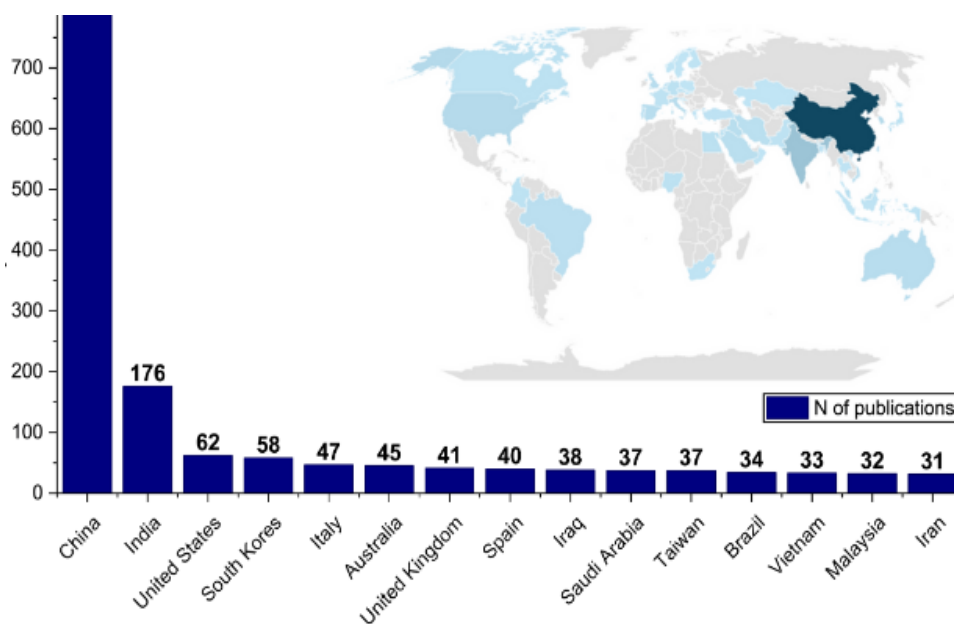


Figura 3. Distribuição por país.

As relações de interações intelectuais e conexões estruturais entre os países foram obtidas da Biblioshiny. A Figura 4 ilustra a rede de colaboração internacional, na qual é possível observar altas taxas de colaboração entre países localizados em uma mesma região geográfica, como ocorre no continente asiático, bem como entre diferentes continentes e com distintas línguas nativas, a exemplo dos United States e da China. Observa-se que a China desempenha o papel de principal centro de colaboração internacional, estabelecendo fortes vínculos com diversos países da Europa, Ásia, Oceania e América do Norte. As conexões mais intensas são observadas com os United States, Australia, United Kingdom e Índia, o que reforça sua posição de liderança na produção e disseminação de conhecimento científico sobre o tema.

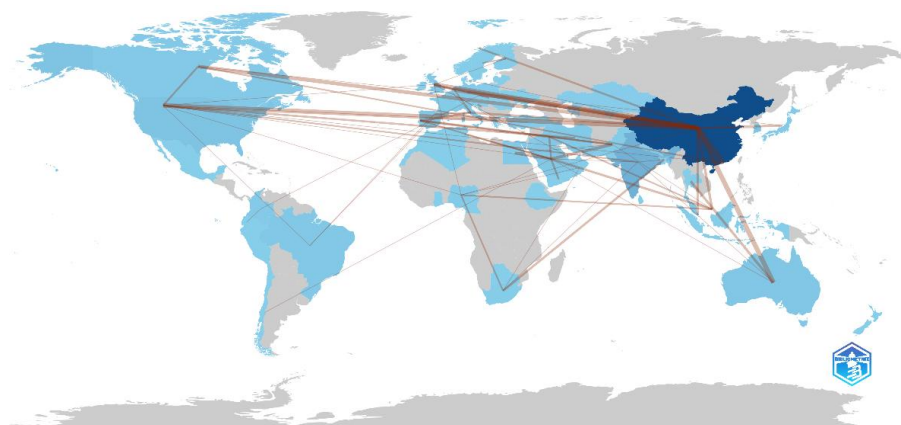


Figura 4. Rede de colaboração entre países.

3.4 Contribuição das Fontes de Publicação

A análise das fontes documentais revelou que os 1.601 documentos se encontram distribuídos entre 308 periódicos. A Tabela 3 mostra os dez períodos com maior número de publicações na área, os quais concentram aproximadamente 46,66% das publicações analisadas. O periódico Construction and building materials se destaca com o maior número de documentos publicados (316) e, conseqüentemente, o periódico com maior número de citações (16.775), evidenciando seu papel no avanço do conhecimento deste domínio. Seguido por Materials (102), journal of Building engineering (90), journal of cleaner production (56) e case studies in construction materials (44), consagrando-se como os cinco períodos mais influentes e com maiores números de documentos.

Tabela 3. Principais fontes documentais.

Classificação	Revista	NP	P	TC	SJR (2024)	ACPP	HI	PY
1	Construction and building materials	316	19,73	16.775	2,094	53,08	76	2003
2	Materials	102	6,37	1.692	0,614	16,59	22	2013
3	Journal of building engineering	90	5,62	1.933	1,636	18,18	26	2018
4	Journal of cleaner production	56	3,50	3.565	2,174	63,66	37	2015
5	Case studies in construction materials	44	2,74	478	1,613	8,53	13	2019
6	Buildings	41	2,56	249	0,652	6,07	8	2022
7	Cement and concrete composites	34	2,12	1.898	4,446	55,82	21	2004
8	Journal of materials in civil engineering	27	1,69	1.071	0,861	39,67	14	2004
9	Sustainability (switzerland)	25	1,56	339	0,688	13,56	11	2017
10	Applied sciences (switzerland)	21	1,31	392	0,521	18,67	9	2019

*NP = Número de publicações, P = Percentual de publicação, TC = Total de citações, SJR = Scimago Journal & Country Rank, HI = H-Índice, ACPP = Citação média por artigo, PY = Ano da 1ª Publicação.

Em termos de impacto científico, o periódico construction and Building materials destacou-se como a fonte mais citada, totalizando 16.775 citações e apresentando com média de 53,08 citações por artigo. Em seguida, o journal of cleaner production obteve 3.565 citações, com média de 63,66 citações por documento. Além da expressiva predominância deste periódico em termos de citações e artigos publicados, o construction and Building Materials foi um dos primeiros periódicos a publicar estudos sobre compósitos cimentícios com escoria de aciaria, em 2003, consolidando-se como a fonte pioneira e de maior tradição na área.

3.5 Contribuição dos Autores

A Figura 5 apresenta os 10 autores mais relevantes com base no número de publicações indexadas no Scopus. Entre eles, Wen Ni lidera com 28 documentos publicados, seguido por Shaopeng Wu e Jiaxiang Liu, ambos com 22 e 20 publicações, respectivamente. Esses autores contribuíram de forma significativa para o entendimento da aplicação de escorias de aciaria em matriz cimentícia e os seus efeitos nas propriedades mecânicas, na estilização desses materiais, e na aplicação de escorias modificadas. Wang Qiang e Ricardo André Fiorotti Peixoto, embora apresentem um menor número de publicação, ambos com 17, também figuram entre os autores mais produtivos do campo.

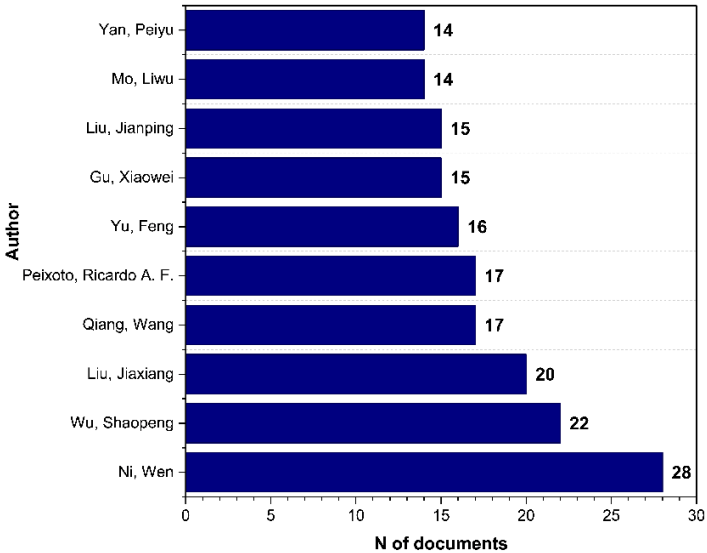


Figura 5. Principais autores na pesquisa em sistemas de escórias de aciaria

Contudo, apenas o volume de publicações por si não é capaz de refletir necessariamente o impacto científico dos autores (Room e Bahadori-Jahromi, 2024). Portanto, a Tabela 4 fornece uma análise mais detalhada e refinada incorporando métricas baseadas em citações, como o índice h, o número total de citação, citações médias por artigo e ano da primeira publicação.

Tabela 4. Principais autores com base no número de publicações e citações

Autor	NP	TC	ACPP	HI	PY
Ni, Wen	28	981	35,04	13	2016
Wu, Shaopeng	22	671	30,50	13	2006
Liu, Jiaxiang	20	557	27,85	11	2013
Qiang, Wang	17	1738	102,23	13	2010
Peixoto, Ricardo A. F.	17	573	33,70	10	2016
Yu, Feng	16	157	9,81	7	2020
Gu, Xiaowei	15	189	12,60	6	2022
Liu, Jianping	15	177	11,80	6	2022
Mo, Liwu	14	948	67,71	10	2017

Yan, Peiyu	14	1602	114,42	13	2010
------------	----	------	--------	----	------

Notavelmente, o autor Wang Qiang se destaca como um dos autores de maior impacto, com 1.738 citações distribuídas em 17 publicações desde 2010, além de um índice h de 13. De forma semelhante, Peiyu Yan, embora possua um número ligeiramente menor de publicações (14), apresenta um desempenho expressivo, com 1.602 citações e índice h igual a 13, consolidando como o segundo autor mais citado. Por outro lado, Wen Ni, apesar de possuir o maior número de artigos publicados (28) e um índice h (13), o autor apresenta um total de citações menor (950), o que sugere que sua produção, embora numerosa, possui impacto relativamente mais modesto em comparação aos autores anteriores.

A frequência de citações de artigos de pesquisa é um dos parâmetros mais importante para avaliar o impacto e a qualidade da pesquisa (Meena *et al.*, 2025). A Tabela 5 mostra uma visão dos 10 documentos mais citados sobre matriz cimentícias com escoria de ciaria nas últimas décadas, com a todos possuindo mais de 300 citações. O artigo de revisão intitulado Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - A review de autoria de Jiang *et al.* (2018) é o documento mais citado na Scopus, com citação total de 688.

Tabela 5. Top 10 artigos com mais citações

R	Autor e ano	Título	TC	C/Y
1	Jiang, Yi et al, 2018	Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - A review	688	86,00
2	Shi, Caijun et al., 2004	Steel Slag - Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties	666	30,27
3	Shi, Caijun et al., 2000	High performance cementing materials from industrial slags - a review	620	23,85
4	Beerling, David J. et al., 2022	Potential for large-scale CO2 removal via enhanced rock weathering with croplands	465	77,5
5	Ahmedzade, Perviz et al., 2009	Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete	453	26,65
6	Maslehuddin, M. et al., 2003	Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes	442	19,22
7	Kourounis, S. et al., 2007	Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag	425	22,37
8	Gencel, Osman et al., 2021	Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review	325	65
9	Song, Qifeng et al., 2021	Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment	320	64
10	Qasrawi, Hisham et al., 2009	Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate	310	18,24

* R = Rank, TC = Total de citações, C/Y = Citação por ano.

Logo em seguida, o documento *Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties*, de autoria de Shi *et al.* (2004), destaca-se como o segundo mais citado com 666 citações, evidenciando seu impacto significativo na área. Nesse contexto, o artigo discute as formas de produção, o processamento e as propriedades da escoria de aciaria, além de analisar as características de matriz cimentícia com a implementação desse subproduto.

3.6. Principais instituições/ organizações contribuintes

A Figura 6 representa as dez instituições mais promissoras na produção de documentos de pesquisa na área de matrizes cimentícias incorporando escórias de aciaria. Verifica-se que todas as dez instituições estão localizadas na China, o que reforça a liderança do país nesse campo de pesquisa. Conforme ilustra a Figura 6 (A), a University Of Science And Technology Beijing destaca-se com o maior número de publicações (com 64 documentos), seguida pelo State Key Laboratory Of Silicate Materials For Architectures e pela Southeast University, com 57 e 48 publicações, respectivamente. Observa-se, ainda, que instituições como Wuhan University Of Technology e Chang'an University também apresentam contribuições científicas expressivas, figurando entre as cinco instituições com maior volume de trabalhos publicados sobre o tema.

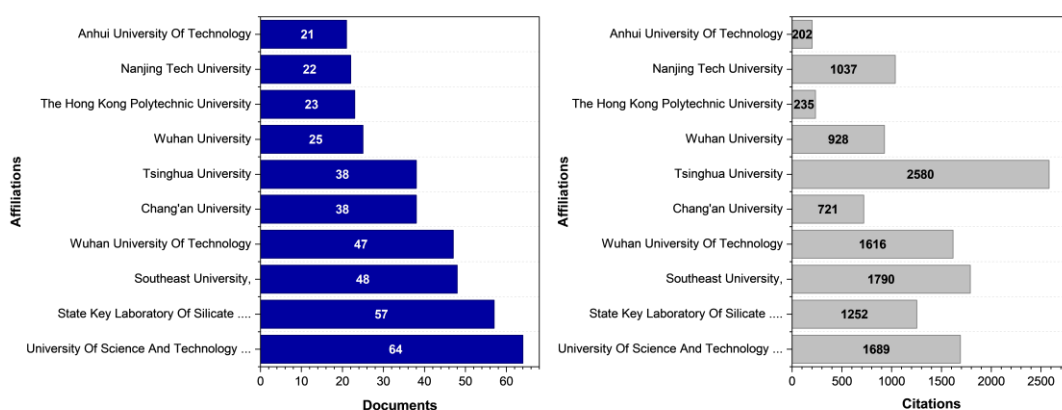


Figura 6. Top 10 das afiliações mais relevantes. (A) Número de publicações e (B) número de citações

A Figura 6 (B) apresenta o número total de citações associadas às publicações das dez instituições mais produtivas na área. Observa-se que, apesar da University Of Science And Technology Beijing possuir o maior volume de publicações, a Tsinghua University se destaca em termos de impacto científico, acumulando o maior número de citações, com 2.580 citações. Seguinda pela Southeast University e University Of Science And Technology Beijing com 1.790 e 1.689 citações, respectivamente. Esses resultados

evidenciam que a quantidade de publicações nem sempre se correlaciona diretamente com o impacto científico, destacando a importância de avaliar simultaneamente a produtividade e a influência das pesquisas.

3.7. Coocorrência de palavras-chave

As palavras-chave possuem um papel importante na recuperação de informações, influenciando diretamente a qualidade e a relevância dos resultados de busca em uma determinada área de pesquisa (Arias-Cárdenas, Lacasta e Haurie, 2024). Diante disso, a análise realizada nesta seção considerou todas as palavras-chave extraídas dos artigos, abrangendo tanto as palavras-chave dos autores quanto as palavras-chave plus, que correspondem a termos adicionais identificados e incluídas nos metadados dos artigos com o objetivo de ampliar sua capacidade de indexação e descoberta.

As dez palavras-chave com mais ocorrências nos documentos selecionados para este estudo estão listadas na Tabela 6. Os termos mais recorrentes foram “slags” (1.108 ocorrências), “steel slag” (977 ocorrências), “compressive strength” (692 ocorrências), “concrete aggregates” (343 ocorrências) e “hydration” (314 ocorrências), indicando que grande parte dos estudos se concentra na caracterização e no desempenho mecânico de matrizes cimentícias incorporando escórias de aciaria, seja como substituição parcial de agregados ou de ligantes. A presença de termos como “fly as” (216 ocorrências) demonstra a integração de outros resíduos industriais em estudo comparativos ou complementares, ampliando a discussão sobre materiais alternativos de baixo impacto ambiental.

Tabela 6. Top 10 palavras-chave de alta ocorrência

Palavra-chave	Ocorrências	Força total do elo
Slags	1108	11355
Steel slag	977	8608
Compressive strength	692	7122
Concrete aggregates	343	3713
Hydration	314	3551
Cements	245	2798
Concretes	244	2418
Aggregates	230	2522
Fly ash	216	2411
Mortar	213	2169
Blast furnaces	210	2475
Concrete	190	1753
Cementitious materials	174	1931
Slag	165	1862

Portland cement

163

1966

Para elucidar as informações visuais sobre a coincidência do uso das principais palavras-chave, foi gerada uma rede de coocorrência por meio do Software VOSviewer, conforme pode ser visualizado na Figura 7. O número mínimo de ocorrências para uma palavra-chave foi definido em 50 e, das 8.661 palavras-chave identificadas, apenas 71 atingiram esse limite. O mapa gerado apresenta uma rede de conexões estruturadas em três clusters temáticos principais.

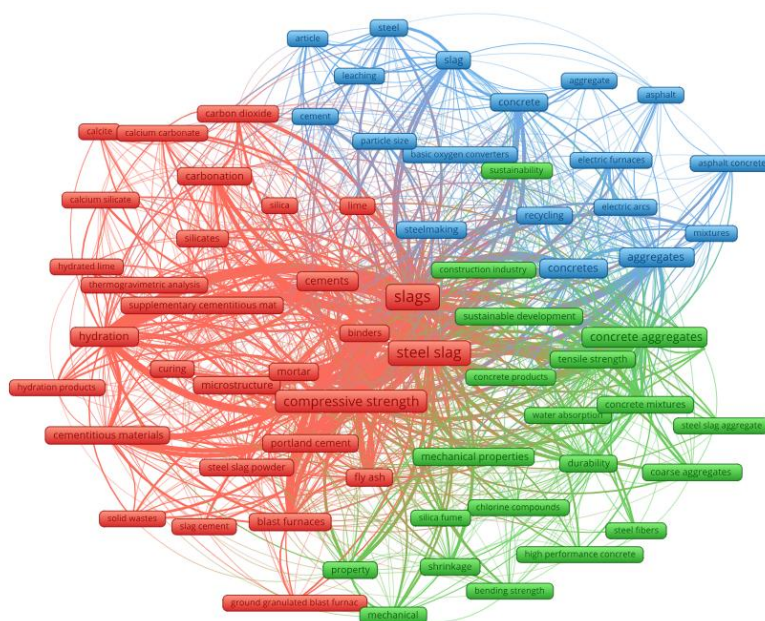


Figura 7. Visualização em rede da coocorrência de palavras-chave

A análise da Figura x mostra que o cluster 1 (vermelho) é o mais numeroso, reunindo termos como “slags”, “steel slag”, “compressive strength”, “hydration”, “cements” e “mortar”, representando o núcleo central das pesquisas voltadas às caracterizações físico-química das escorias de aciarias e à avaliação de suas propriedades mecânicas e microestrutural em matrizes cimentícias.

O cluster 2 (Verde) é composto por termos como “concrete aggregates”, “mechanical properties”, “durability”, “tensile strength” e “high performance concrete”, indicando estudos focados nas propriedades mecânicas e na durabilidade de compósitos cimentícios com escorias de aciaria. Por fim, o cluster 3 (azul), o menor em termos, abrange termos como “recycling”, “sustainability”, refletindo o interesse em abordagens relacionadas à sustentabilidade, reutilização de resíduos e proporcionando uma economia circular na indústria da construção.

3.8 Tendencias e Perspectivas

A análise bibliométrica da literatura evidencia um crescimento significativo das pesquisas sobre a incorporação da escória de aciaria em matrizes cimentícias, especialmente nas últimas décadas, em consonância com as agendas globais de sustentabilidade, economia circular e mitigação das emissões de carbono na construção civil. Inicialmente, os estudos concentraram-se na viabilidade técnica da escória como substituto parcial de agregados naturais ou do cimento Portland. Com a maturação do campo, o escopo das pesquisas foi ampliado, incorporando avaliações mais abrangentes de durabilidade, desempenho em ambientes agressivos e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.

Entre as tendências emergentes, destaca-se o uso da escória de aciaria como material cimentício suplementar e como precursor em sistemas alternativos, como ligantes ativados alcalinamente e concretos geopoliméricos. Paralelamente, estratégias de pré-tratamento, como moagem fina, envelhecimento controlado e carbonatação acelerada, têm sido amplamente investigadas para mitigar a instabilidade volumétrica e aumentar a reatividade do material em matrizes convencionais.

Mais recentemente, observa-se a consolidação de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de compósitos cimentícios autossensoriais com incorporação de escória de aciaria. Nessa abordagem, o material passa a desempenhar também uma função funcional, associada à condução elétrica e à resposta eletromecânica do compósito. Estudos indicam que frações ricas em óxidos de ferro e fases condutoras favorecem a formação de redes condutivas na matriz, possibilitando o monitoramento indireto de deformações, fissuração e danos estruturais por meio de variações na resistividade elétrica ou impedância.

Essa linha de investigação insere-se no contexto dos concretos inteligentes e das infraestruturas autossensoriais, com potencial aplicação em sistemas de monitoramento estrutural em tempo real (Structural Health Monitoring – SHM). Entre as principais vantagens destacam-se a redução de custos em relação a materiais condutores convencionais e os benefícios ambientais associados à valorização de resíduos industriais. Entretanto, permanecem desafios técnicos relevantes, como o controle da dispersão do material condutor, a influência da umidade e da porosidade na resposta elétrica e a estabilidade do sinal sensorial ao longo do tempo.

Por fim, a literatura aponta a necessidade de aprofundar estudos sobre a variabilidade composicional da escória de aciaria e seus efeitos no desempenho sensorial, bem como de

desenvolver diretrizes técnicas e normativas para aplicação em escala real. Adicionalmente, observa-se uma tendência de integração entre análises bibliométricas, desempenho mecânico, funcionalidade autossensorial e avaliação ambiental, contribuindo para uma compreensão mais abrangente das oportunidades e limitações desses compósitos na engenharia civil inteligente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram que as publicações se concentram predominantemente nas de Engineering, Materials Science e Environmental Science, que, em conjunto, correspondem a aproximadamente 71,44% das publicações recuperadas e analisadas. Observou-se um crescimento expressivo do número de publicações, especialmente após 2018, alcançando uma taxa anual de crescimento de 21,98%, o que evidencia o crescente interesse científico e tecnológico no aproveitamento sustentável das escorias em materiais cimentícios.

No panorama global, China, Índia e United States destacam-se como os países mais produtivos e influentes nessa área de pesquisa, contribuindo com aproximadamente 66,21% das publicações totais, evidenciando sua liderança e impacto no cenário global de pesquisas. Entre os autores, Wen Ni, Shaopeng Wu, Jiaxiang Liu consolidaram-se como os principais contribuintes científico, apresentando-se como os autores com maior número de publicações. Enquanto Wang Qiang figura-se como o autor com o maior número total de citações (aproximadamente 1.738), tornando-se o pesquisador de maior impacto acadêmico em termos de citações.

REFERÊNCIAS

- Ahmedzade P, Sengoz B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. **Journal of Hazardous Materials** 2009;165:300–5.
- Ali O, Astuti P. Reimagining steel slag in sustainable concrete: A bibliometric and experimental review. **Research on Engineering Structures & Materials** 2025;11:2637–66.
- Al-Luhybi AS, Ali TKM, Qader DN, Ali M, Maureira-Carsalade N, Parra PF, et al. Evaluating the mechanical performance and durability of cement mortars incorporating sesame shells as partial cement and sand replacement. **Scientific Reports** 2025;15:1–21.
- Amarasinghe I, Liu T, Stewart RA, Mostafa S. Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector. **Clean Technologies and Environmental Policy** 2024;27:1825–43.

Arias-Cárdenas B, Lacasta AM, Haurie L. Bibliometric analysis of research on thermal, acoustic, and/or fire behaviour characteristics in bio-based building materials. **Construction and Building Materials** 2024;432:136569.

Beerling DJ, Kantzas EP, Lomas MR, Wade P, Eufrasio RM, Renforth P, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature** 2020;583:242–8.

Behera M, Bhattacharyya SK, Minocha AK, Deoliya R, Maiti S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials** 2014;68:501–16.

Bertoldo N, Qureshi T, Simpkins D, Arrigoni A, Dotelli G. Concrete with Organic Waste Materials as Aggregate Replacement. **Applied Sciences** 2024;14:108.

Cai X, Cao Z, Sun J, Wang H, Wu S. Influence of Steel Slag on Properties of Cement-Based Materials: A Review. **Buildings** 2024;14:2985.

Choi SH, Oh SE, Won J, Chung SY. Impact of cleaning methods on the properties of cement mortars with cockle shell fine aggregates. **Case Studies in Construction Materials** 2025;23:e05143.

Cui P, Ma T, Chen F, Zhang Y, Liu X. Bibliometric Analysis of Steelmaking Slag-Related Studies for Research Trends and Future Directions. **Minerals** 2022;12:1520.

Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research** 2021;133:285–96.

Faisal A, Biswal P, Bhattacharya D, Kumar S, Banerjee M, Bhowmick GD, et al. Towards sustainable aquaponics: a bibliometric analysis of trends, scientific developments, and thematic evolution. **Aquaculture International** 2025;33:1–29.

Gavela S, Nikoloutsopoulos N, Galati TK, Sotiropoulou A. Thermal Conductivity and Thermal Behavior of Mortar Containing Wood Shavings and Sawdust. **Applied Sciences** 2025;15:5911.

Gencel O, Karadag O, Oren OH, Bilir T. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. **Construction and Building Materials** 2021;283:122783.

Guleria D, Kaur G. Bibliometric analysis of ecopreneurship using VOSviewer and RStudio Bibliometrix, 1989–2019. **Library Hi Tech** 2017;39:1001–24.

Ige OE, Von Kallon DV, Desai D. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. **Clean Technologies and Environmental Policy** 2024;26:579–97.

Jiang Y, Ling TC, Shi C, Pan SY. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review. **Resources, Conservation and Recycling** 2018;136:187–97.

Kourounis S, Tsivilis S, Tsakiridis PE, Papadimitriou GD, Tsibouki Z. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. **Cement and Concrete Research** 2007;37:815–22.

Martínez-García C, González-Fontboa B, Carro-López D, Martínez-Abella F. Design and properties of cement coating with mussel shell fine aggregate. **Construction and Building Materials** 2019;215:494–507.

- Maslehuddin M, Sharif AM, Shameem M, Ibrahim M, Barry MS. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. **Construction and Building Materials** 2003;17:105–12.
- Matsimbe J, Dinka M, Olukanni D, Musonda I. A Bibliometric Analysis of Research Trends in Geopolymer. **Materials** 2022;15:6979.
- Meena BP, Yadav DK, Yeasin M, Shirale AO, Gurav PP, Shinogi KC, et al. Emerging research trends on biochar application in agriculture: A scientometric analysis. **Cleaner and Circular Bioeconomy** 2025;12:100166.
- Meijssen M, Becattini V, Mazzotti M. Integrated Carbon Capture and Utilization in the Cement Industry: A Comparative Study. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering** 2024;12:2709–18.
- Mosly I. Carbon Footprint of Global Construction Industries: A Cross-Country Analysis of Emissions, Drivers, and the Construction Carbon Sustainability Index (1990–2023). **Sustainability** 2025;17:9274.
- Öztürk O, Kocaman R, Kanbach DK. How to design bibliometric research: an overview and a framework proposal. **Review of Managerial Science** 2024;18:3333–61.
- Passas I. Bibliometric Analysis: The Main Steps. **Encyclopedia** 2024;4:1014–25.
- Qasrawi H, Shalabi F, Asi I. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate. **Construction and Building Materials** 2009;23:1118–25.
- Ramadhan MA, Sutarto, Widodo S, Anisah. Bibliometric Analysis to Reveal Research Evolution and Educational Technology Trends in Civil Engineering Education. **International Journal of Learning, Teaching and Educational Research** 2024;23:87–110.
- Room S, Bahadori-Jahromi A. Biochar-Enhanced Carbon-Negative and Sustainable Cement Composites: A Scientometric Review. **Sustainability** 2024;16:10162.
- Shi C, Qian J. High performance cementing materials from industrial slags — a review. **Resources, Conservation and Recycling** 2000;29:195–207.
- Shi C. Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering** 2004;16:230–6.
- Song Q, Guo MZ, Wang L, Ling TC. Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. **Resources, Conservation and Recycling** 2021;173:105740.
- Tripathy P, Jena PK, Mishra BR. Systematic literature review and bibliometric analysis of energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 2024;200:114583.
- van Eck NJ, Waltman L. Visualizing Bibliometric Networks. **Measuring Scholarly Impact** 2014:285–320.
- Wei X, Sun X, Du H, Ni W, Kong X, Ren C. Recycle of steel slag as cementitious material and fine aggregate in concrete: mechanical, durability property and environmental impact. **Environmental Science and Pollution Research** 2024;31:56194–209.
- Xue P, Xu A, He D, Yang Q, Liu G, Engström F, et al. Research on the sintering process and characteristics of belite sulphoaluminate cement produced by BOF slag. **Construction and Building Materials** 2016;122:567–76.

Yıldız M, Karakuş Yılmaz T. Bibliometric Analysis in Scientific Research Using R: A Review of Scopus and Web of Science Databases. **Journal of Data Applications** 2024;0:31–46.

Zhang X, Li H, Li S, Ding Y, Zhang H, Tong Y, et al. Test and Microstructural Analysis of a Steel Slag Cement-Based Material Using the Response Surface Method. **Materials** 2022;15:3114.

Zhao SR, Zhang KF, Meng G, Yao Y, Wang N, Geng F, et al. Experimental Study on the Comprehensive Application of Steel Slag in Concrete. **Materials Science Forum** 2016;867:157–61.