

Revisão sistemática sobre o uso de cinzas vulcânicas como material cimentício suplementar: propriedades mecânicas e de durabilidade para aplicações no Equador.

L. J. Fernández-Sánchez^{1*} , L. M. Fernández-Delgado² , D. E. Fernández-Sánchez³ ,
R. S. Quintana-Vásquez¹ , Y. Díaz-Cárdenas⁴ , S. G. Castro-Angulo^{1,5} 

* Autor de Contato: ljfernandez@pucesa.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1010>

Recebido: 05/01/2026 | Correções recebidas: 12/08/2026 | Aceito: 21/08/2026 | Publicado: 01/09/2026

RESUMEO

Esta revisão sistemática avalia o uso de cinza vulcânica como material cimentício suplementar em argamassas e concretos, com ênfase em sua aplicabilidade no contexto equatoriano. Foram analisados estudos indexados por meio de uma estratégia bibliométrica e de uma síntese técnica do desempenho mecânico, da durabilidade e dos mecanismos pozolânicos. Os resultados mostram faixas favoráveis de substituição entre 10% e 25%, associadas ao refinamento da estrutura porosa e à formação de C-S-H/C-A-S-H. No entanto, sua ampliação é limitada pela variabilidade química, pela finura, pela disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pela necessidade de caracterização local. A originalidade reside na discussão desses limites frente à redução do fator clínquer. Conclui-se que sua aplicação requer validação técnica, normativa, logística e industrial.

Palabras clave: cinza vulcânica; material cimentício suplementar; durabilidade; reação pozolânica; fator clínquer.

Citar como: Fernández-Sánchez, L. J., Fernández-Delgado L. M., Fernández-Sánchez, D. E., Quintana-Vásquez, R. S., Díaz-Cárdenas, Y., Castro-Angulo, S. G. (2026), “Revisão sistemática sobre o uso de cinzas vulcânicas como material cimentício suplementar: propriedades mecânicas e de durabilidade para aplicações no Equador.”, Revista ALCONPAT, 16 (3), pp. 372 – 410, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i3.1010>

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato-Ecuador.

² Universidad Tecnológica Indoamérica, Ambato-Ecuador.

³ Investigador independiente, Ambato-Ecuador.

⁴ Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara-Cuba.

⁵ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, (FIC-UANL), Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León 66455, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor L.J. Fernández-Sánchez liderou e contribuiu na busca, seleção, extração e organização da literatura científica (50%), na síntese das informações e integração final dos resultados (60%) e na redação e revisão crítica do conteúdo e do manuscrito (70%); o autor R.S. Quintana-Vásquez contribuiu na busca, seleção, extração e organização da literatura (35%) e na análise temática e interpretação dos estudos incluídos (60%); o autor D.E. Fernández-Sánchez contribuiu na busca, seleção, extração e organização da literatura (15%) e na definição, verificação e validação da consistência metodológica (35%); o autor L.M. Fernández-Delgado contribuiu na definição dos critérios metodológicos (35%) e na redação e revisão crítica do conteúdo e do manuscrito (15%); o autor Y. Díaz-Cárdenas contribuiu na análise temática e interpretação dos estudos incluídos (40%); e S.G. Castro-Angulo contribuiu na validação metodológica (30%), na redação e revisão crítica do conteúdo e do manuscrito (15%) e na síntese das informações e integração final dos resultados (40%).

Systematic review on the use of volcanic ash as a supplementary cementitious material: mechanical and durability properties for applications in Ecuador.

ABSTRACT

This systematic review evaluates volcanic ash as a supplementary cementitious material in mortars and concretes, emphasizing its applicability to the Ecuadorian context. Indexed studies were analyzed through a bibliometric strategy and a technical synthesis of mechanical performance, durability, and pozzolanic mechanisms. Results show favorable replacement ranges of 10–25%, associated with pore refinement and C-S-H/C-A-S-H formation. However, wider implementation is limited by chemical variability, fineness, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ availability, and the need for local characterization. The originality of this review lies in discussing these technical limits in relation to clinker factor reduction. It is concluded that its application requires technical, normative, logistical, and industrial validation.

Keywords: volcanic ash; supplementary cementitious material; durability; pozzolanic reaction; clinker factor.

Revisión sistemática sobre el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario: propiedades mecánicas y de durabilidad para aplicaciones en Ecuador.

RESUMEN

Esta revisión sistemática evalúa el uso de ceniza volcánica como material cementante suplementario en morteros y concretos, con énfasis en su aplicabilidad al contexto ecuatoriano. Se analizaron estudios indexados mediante una estrategia bibliométrica y una síntesis técnica de desempeño mecánico, durabilidad y mecanismos puzolánicos. Los resultados muestran rangos favorables de sustitución entre 10–25%, asociados al refinamiento poral y a la formación de C-S-H/C-A-S-H. No obstante, su ampliación está limitada por la variabilidad química, la finura, la disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y la caracterización local. La originalidad radica en discutir estos límites frente a la reducción del factor clínker. Se concluye que su aplicación requiere validación técnica, normativa, logística e industrial.

Palavras-chave: ceniza volcánica; material cementante suplementario; durabilidad; reacción puzolánica; factor clínker.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2027, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2027.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. TABELA DE NOMENCLATURAS

Acrônimo Acrônimo	Significado
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
C-A-S-H	Aluminosilicato de Cálcio Hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
SCM	Materiais cimentícios suplementares
GWP100	Potencial de aquecimento global
TAP100	Potencial de acidificação terrestre
FEP	Potencial de eutrofização de água doce
MEP	Potencial de eutrofização marinha
ODP _{inf}	Potencial de depleção da camada de ozônio
POFP	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos
PMFP	Potencial de formação de material particulado
FDP	Potencial de esgotamento de combustíveis fósseis
EC	Equador
GLO	Global
CV	Cinza Vulcânica
SiO ₂	Dióxido de Silício
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro III
CaO	Óxido de Cálcio
PRISMA	Itens de relato preferenciais para revisões sistemáticas e meta-análises
MgO	Óxido de Magnésio
K ₂ O	Óxido de Potássio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
SO ₃	Óxido de Enxofre
D ₅₀	Tamanho médio das partículas
BET	Brunauer-Emmett-Teller
ITZ	Zona de transição interfacial
AFm	Monossulfato de ferrita de aluminato
XRF	Fluorescência de Raios X
LOI	Perda ao fogo
ACV	Análise do Ciclo de Vida

2. INTRODUÇÃO

A indústria do cimento constitui um dos setores industriais mais intensivos em carbono, principalmente devido à produção de clínquer Portland. Em escala global, a fabricação de cimento representa aproximadamente entre 7% e 8% das emissões antropogênicas de CO₂, enquanto a

intensidade direta das emissões do cimento tem se mantido próxima de 0,6 t de CO₂ por tonelada de cimento produzido nos últimos anos (Garces-Vargas et al., 2024; Rovnaník et al., 2007; N. Singh et al., 2023). Essa condição é explicada pela dupla contribuição da calcinação do calcário e do consumo energético do forno, o que torna a redução do fator clínquer uma estratégia prioritária para diminuir a pegada ambiental do concreto. Nesse contexto, o uso de materiais cimentícios suplementares (SCM) permite substituir parcialmente o cimento Portland, reduzir o teor de clínquer e valorizar recursos minerais ou subprodutos com menor impacto ambiental (Fernández-Jiménez et al., 2023; A. Rajesh et al., 2023; Sharma et al., 2021). A cinza vulcânica, devido à sua origem natural, à potencial disponibilidade em regiões vulcânicas e ao seu comportamento pozolânico, constitui uma alternativa relevante para sistemas cimentícios sustentáveis, especialmente no contexto andino, onde o Equador apresenta condições geológicas favoráveis para o estudo de pozolanas naturais de origem vulcânica (Cascone et al., 2025; M. U. Hossain et al., 2021; Pinto-Almeida et al., 2025; Sokołowska, 2025).

Tradicionalmente, a redução do fator clínquer tem se baseado no uso de materiais cimentícios suplementares (SCM), incluindo subprodutos industriais e pozolanas naturais, como cinza volante, escória granulada de alto-forno, sílica ativa e pozolanas naturais. No entanto, a disponibilidade futura desses materiais é limitada tanto por questões relacionadas à oferta quanto por transformações estruturais associadas à transição energética, particularmente pela redução do uso de carvão na geração de energia elétrica e pela descarbonização progressiva dos setores metalúrgicos. Essa situação reforça a necessidade de identificar fontes alternativas de SCM que não dependam exclusivamente de cadeias industriais intensivas em carbono. Nesse sentido, as pozolanas naturais e as cinzas vulcânicas adquirem relevância estratégica, uma vez que podem contribuir para a redução do teor de clínquer sem depender da disponibilidade futura de cinza volante ou escória.

No caso equatoriano, a produção de clínquer concentra a maior contribuição ambiental dentro do sistema cimenteiro avaliado, superando 90% em várias categorias de impacto reportadas para a unidade funcional analisada, conforme observado na Figura 1. Esse impacto é especialmente significativo em GWP100, PMFP e POFP, em razão da calcinação e da combustão no forno.

A produção de coque de petróleo (GLO) é a principal responsável pelo esgotamento dos combustíveis fósseis (FDP) e contribui para a acidificação terrestre (TAP100). O fornecimento de eletricidade e a extração de recursos naturais apresentam impacto na eutrofização da água doce (FEP) e marinha (MEP). Com o objetivo de reduzir os impactos mais significativos do processo de produção do cimento, são propostas as seguintes medidas prioritárias: otimizar o consumo energético, incorporar combustíveis alternativos, avançar na descarbonização da matriz elétrica e reduzir o fator clínquer por meio da utilização de SCM, especialmente a cinza vulcânica.

Do ponto de vista físico-químico, a eficiência dos materiais cimentícios suplementares (SCM) depende de sua composição química e mineralógica, fração amorfa, finura, superfície específica e capacidade de reagir com a portlandita Ca(OH)₂ gerada durante a hidratação do cimento Portland. Em sistemas cimentícios com cinza vulcânica, as fases silicoaluminosas reativas não atuam de maneira isolada, mas em interação com o cálcio disponível na matriz. Essa reação pozolânica pode favorecer a formação secundária de géis C-S-H e C-A-S-H, semelhantes, em função cimentante, aos principais produtos de hidratação do cimento Portland, contribuindo para o refinamento da rede porosa, a redução da conectividade capilar e a melhoria do desempenho mecânico e químico frente ao ingresso de agentes agressivos. No entanto, em teores elevados de substituição, a menor quantidade de clínquer reduz a geração de Ca(OH)₂, o que pode limitar a reação pozolânica e deixar frações de cinza sem reagir (Fernandes et al., 2025; Játiva et al., 2025; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Shahjalal et al., 2025; S. Singh et al., 2026; Tomoyose et al., 2020).

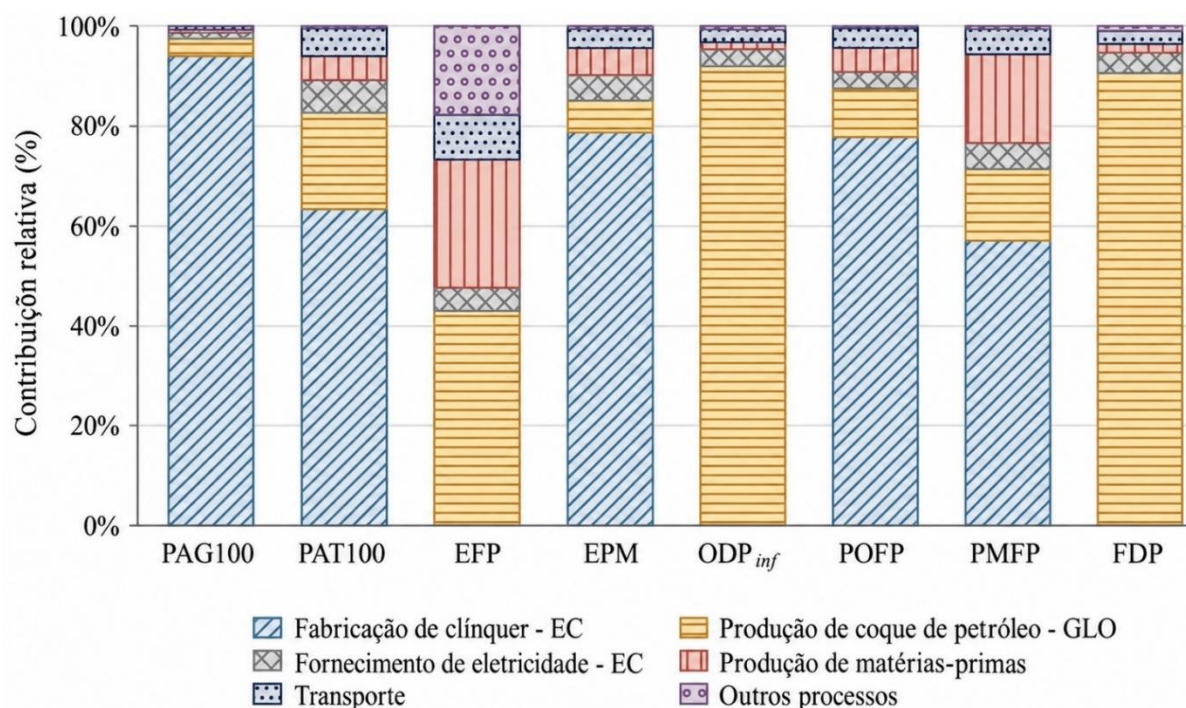


Figura 1. Contribuição relativa dos processos produtivos para as categorias de impacto ambiental por tonelada métrica de clínquer (unidade funcional). GWP100: potencial de aquecimento global; TAP100: potencial de acidificação terrestre; FEP: potencial de eutrofização de água doce; MEP: potencial de eutrofização marinha; ODP_{inf}: potencial de depleção da camada de ozônio; POFP: potencial de formação de oxidantes fotoquímicos; PMFP: potencial de formação de material particulado; FDP: potencial de esgotamento de combustíveis fósseis; EC: Equador; GLO: global. Fonte: adaptado de Petroche & Ramirez (2022).

O Equador está localizado no Cinturão de Fogo do Pacífico e faz parte de uma região andina caracterizada por atividade vulcânica recorrente, emissões de cinzas e presença de depósitos piroclásticos. Essa condição geológica sugere a existência de fontes potenciais de materiais vulcânicos de interesse para aplicações cimentícias; no entanto, seu aproveitamento como material cimentício suplementar (SCM) não pode ser presumido unicamente com base em sua origem vulcânica. A viabilidade técnica depende da composição química, mineralogia, fração amorfa, finura, reatividade pozolânica, acessibilidade do material, continuidade do fornecimento e compatibilidade com cimentos e agregados locais (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

No contexto equatoriano, a valorização da cinza vulcânica como material cimentício suplementar (SCM) enfrenta limitações que vão além da disponibilidade geológica. Entre elas estão a necessidade de laboratórios especializados para a caracterização físico-química e mineralógica, os custos associados à secagem, moagem e classificação do material, a variabilidade espacial e temporal das cinzas, as restrições de acesso a determinadas áreas em razão de condições geográficas ou ambientais e a distância entre as fontes potenciais e as fábricas de cimento ou centrais de concreto. Além disso, a possível localização de depósitos em áreas protegidas ou de difícil acesso pode limitar sua extração e aproveitamento industrial. Portanto, a aplicação de cinza vulcânica no Equador requer uma avaliação integrada do desempenho técnico, impacto ambiental, relação custo-benefício, logística e conformidade normativa (Cavaliere et al., 2024; Mohamad et al., 2020).

Embora haja um número crescente de pesquisas sobre o uso de cinza vulcânica (CV) em materiais de construção, ainda não existe um consenso claro sobre as faixas ideais de substituição nem sobre seus efeitos nas propriedades mecânicas e de durabilidade. As evidências são dispersas devido à

variabilidade química e física da CV em função de sua origem, o que dificulta o estabelecimento de recomendações técnicas consistentes para uma aplicação segura e eficiente em escala industrial. Essa variabilidade manifesta-se em diferenças significativas nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , álcalis, fase amorfa, fases cristalinas, tamanho das partículas e superfície específica. Esses parâmetros condicionam a velocidade da reação pozolânica, a demanda de água, o efeito fíler, a disponibilidade de cálcio para a formação de C-S-H/C-A-S-H e, consequentemente, o desempenho mecânico e a resistência ao ataque químico (Gil-Martín et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Sokołowska, 2025). Portanto, torna-se necessária a consolidação dos resultados para estabelecer uma base de conhecimento que facilite sua incorporação em normas e práticas construtivas, especialmente em um contexto como o equatoriano.

Nesse contexto, a presente revisão sistematizada tem como objetivo avaliar criticamente o uso de cinza vulcânica como material cimentício suplementar em argamassas e concretos, considerando: (i) seu efeito sobre a resistência à compressão e à flexão; (ii) sua influência na durabilidade, particularmente sobre a permeabilidade, o transporte de cloretos, o ataque por sulfatos e a carbonatação; (iii) os mecanismos pozolânicos e microestruturais que explicam seu desempenho; e (iv) os limites técnicos das faixas de substituição frente à redução do fator clínquer e sua possível aplicação no Equador. Diferentemente de revisões centradas exclusivamente nos percentuais de substituição ou nas propriedades mecânicas, este trabalho integra a análise bibliométrica da produção científica, a síntese técnica das propriedades mecânicas e de durabilidade, a caracterização físico-química das cinzas vulcânicas e uma discussão crítica das condições necessárias para sua valorização no contexto equatoriano.

3. PROCEDIMENTO

3.1 Descrição da abordagem metodológica, estratégia de busca e seleção

Este estudo foi desenvolvido como uma revisão sistematizada da literatura com análise bibliométrica complementar, orientada à síntese de evidências científicas sobre o uso de cinza vulcânica como material cimentício suplementar em argamassas e concretos. O procedimento metodológico foi organizado em cinco etapas: definição das questões de pesquisa, busca bibliográfica, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, extração de dados técnicos e análise bibliométrica e temática.

A revisão não foi concebida como uma meta-análise estatística, devido à heterogeneidade dos estudos incluídos quanto à origem da cinza vulcânica, composição química, finura, percentual de substituição, relação água/material cimentício, idade de ensaio, tipo de mistura e método experimental, sendo estes dados relevantes que permitem a análise crítica. Por essa razão, a síntese foi realizada de forma narrativa e comparativa, identificando tendências, faixas de desempenho, mecanismos relatados e limitações técnicas para sua aplicação no contexto equatoriano. Foram considerados exclusivamente artigos indexados na Scopus, em razão de seu prestígio, rigor editorial e ampla cobertura nas áreas de materiais de construção, engenharia civil e sustentabilidade. O processo foi organizado em três fases: busca, filtragem e seleção final, orientadas por três questões específicas de pesquisa.

1. Como o teor de cinza vulcânica influencia a resistência à compressão e à flexão de argamassas e concretos?
2. Qual é o efeito da cinza vulcânica na durabilidade de argamassas e concretos frente ao ataque por sulfatos e em sua permeabilidade?
3. Quais são as faixas ideais de teor de cinza vulcânica para um uso sustentável e eficiente?

Essas questões permitiram definir os descritores de busca e os operadores booleanos ou lógicos utilizados na Scopus, combinando termos como “*volcanic ash*”, “*supplementary cementitious materials*”, “*compressive strength*”, “*flexural strength*”, “*durability*”, “*sulfate resistance*” e

“*permeability*”. Foram aplicados filtros para restringir os resultados a artigos revisados por pares, publicados entre 2011 e 2025, em inglês ou espanhol, nas áreas temáticas de engenharia, ciência dos materiais e ciências ambientais.

3.2 Fonte de informação e estratégia de busca.

A busca bibliográfica foi realizada na base de dados Scopus, selecionada por sua cobertura nas áreas de engenharia civil, ciência dos materiais, tecnologia do concreto, sustentabilidade e materiais cimentícios. A consulta foi direcionada à identificação de artigos científicos e revisões relacionados à cinza vulcânica, pozolanas naturais e materiais cimentícios suplementares aplicados a argamassas e concretos.

Essa decisão permitiu manter uma base documental homogênea e rastreável para a análise bibliométrica; no entanto, reconhece-se que o uso de uma única base de dados pode limitar a abrangência da revisão e introduzir viés de cobertura. Portanto, a ausência de bases complementares, como a Web of Science, é declarada como uma limitação metodológica do estudo e deverá ser considerada em futuras revisões ampliadas.

3.3 Critérios de Inclusão e Exclusão

Os registros identificados foram avaliados em dois níveis. O primeiro nível correspondeu à análise bibliométrica, na qual foram considerados todos os documentos recuperados por meio da string de busca e dos filtros aplicados na Scopus.

O segundo nível correspondeu à síntese técnica, para a qual foram selecionados exclusivamente os estudos que apresentavam informações verificáveis sobre misturas de argamassa ou concreto contendo cinza vulcânica como material cimentício suplementar (SCM).

Foram incluídos estudos que atenderam aos seguintes critérios:

- Avaliar argamassas, pastas ou concretos com cinza vulcânica, pozolana vulcânica, escória vulcânica ou material vulcânico natural utilizado como material cimentício suplementar (SCM).
- Informar o percentual de substituição, dosagem ou proporção de incorporação do material vulcânico.
- Apresentar pelo menos uma propriedade mecânica, de durabilidade, microestrutural ou físico-química.
- Incluir informações sobre resistência à compressão, resistência à flexão, permeabilidade, ataque por sulfatos, transporte de agentes agressivos, atividade pozolânica, composição química, mineralogia, finura ou tamanho das partículas.
- Corresponder a artigos científicos ou revisões indexadas, publicados dentro do período definido para a busca.
- Incluir estudos sobre pastas, argamassas ou concretos à base de cimento Portland ou sistemas cimentícios comparáveis, nos quais a cinza vulcânica, pozolana vulcânica ou material vulcânico natural tenha sido utilizada como SCM.

Foram excluídos documentos que:

- Apresentavam estudos nos quais a cinza vulcânica fazia parte de misturas multicomponentes, mas sem apresentar resultados que permitissem distinguir seu efeito individual ou sua contribuição específica dentro do sistema cimentício.
- Não apresentavam dados técnicos comparáveis sobre composição, dosagem, desempenho ou caracterização.
- Correspondiam a documentos não revisados por pares, resumos, editoriais, notas técnicas ou comunicações sem dados experimentais.
- Apresentavam duplicidade documental ou informações insuficientes para a extração de dados.

3.4 Processo de triagem e seleção dos estudos

A busca inicial permitiu identificar 422 registros na Scopus. Esses documentos constituíram a base para a análise bibliométrica geral, incluindo a evolução temporal das publicações, áreas temáticas, fontes, países e palavras-chave. No entanto, nem todos os registros foram utilizados para a extração técnica dos dados, uma vez que vários documentos correspondiam a estudos gerais sobre pozolanas naturais, materiais cimentícios suplementares ou aplicações não diretamente comparáveis com argamassas e concretos contendo cinza vulcânica.

Posteriormente, os registros foram submetidos a um processo de triagem por título, resumo e palavras-chave. Nessa etapa, foram excluídos 262 documentos por não corresponderem diretamente ao uso de cinza vulcânica como material cimentício suplementar em sistemas cimentícios, por abordarem aplicações não relacionadas a argamassas ou concretos ou por não apresentarem informações técnicas pertinentes aos objetivos da revisão. Em seguida, 160 documentos foram avaliados em texto completo, sendo excluídos 50 documentos por não apresentarem dados suficientes sobre dosagem, desempenho mecânico, durabilidade, caracterização físico-química ou mecanismos pozolânicos.

Finalmente, 110 estudos foram incluídos na síntese técnica dos resultados.

Para melhorar a rastreabilidade do processo, foi incorporado um fluxograma (Figura 2) de seleção dos estudos e uma tabela suplementar com os documentos incluídos na síntese técnica, indicando autor, ano, tipo de material vulcânico, percentual de substituição, tipo de matriz cimentícia, propriedades avaliadas e principais resultados.

O processo de identificação, triagem, avaliação em texto completo e inclusão está resumido na Figura 2. Dos 422 registros identificados, 110 estudos atenderam aos critérios estabelecidos para a síntese técnica.

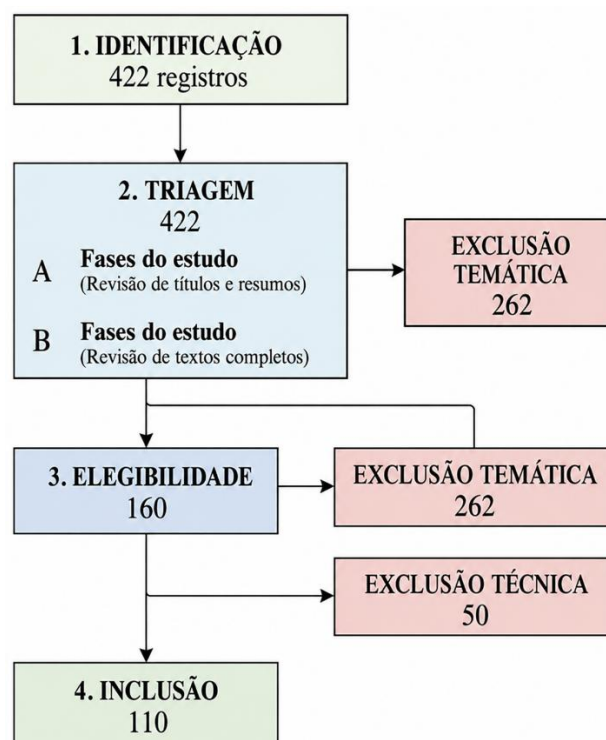


Figura 2. Diagrama de fluxo do processo de busca, triagem e inclusão de estudos.

Fonte: elaboração própria.

Os 422 registros recuperados na Scopus foram utilizados para a análise bibliométrica. A síntese técnica foi realizada exclusivamente com os 110 estudos que atenderam aos critérios de inclusão e

que apresentaram informações verificáveis sobre dosagem, desempenho mecânico, durabilidade, caracterização físico-química ou mecanismos pozolânicos da cinza vulcânica como material cimentício suplementar.

3.5 Extração e síntese de dados

A extração dos dados foi realizada exclusivamente nos 110 estudos incluídos na síntese técnica. Para cada estudo, foram registradas variáveis bibliográficas, metodológicas e tecnológicas. As variáveis bibliográficas incluíram autor, ano e fonte de publicação. As variáveis metodológicas consideraram o tipo de matriz cimentícia, percentual de substituição, relação água/material cimentício, idade de ensaio e condições de cura. As variáveis tecnológicas incluíram resistência à compressão e à flexão, permeabilidade, resistência ao ataque por sulfatos, transporte de cloretos, composição química, mineralogia, finura, tamanho das partículas, superfície específica, atividade pozolânica e produtos de hidratação relatados.

A síntese foi desenvolvida por meio de comparação narrativa e análise temática, agrupando os resultados em quatro eixos: desempenho mecânico, durabilidade, mecanismos físico-químicos e viabilidade de aplicação (Figura 3). Devido à heterogeneidade dos materiais, dos delineamentos experimentais e das condições de ensaio, não foi realizada meta-análise quantitativa.

A sequência geral de busca, processamento bibliométrico, seleção de variáveis e apresentação dos resultados está representada na Figura 3.

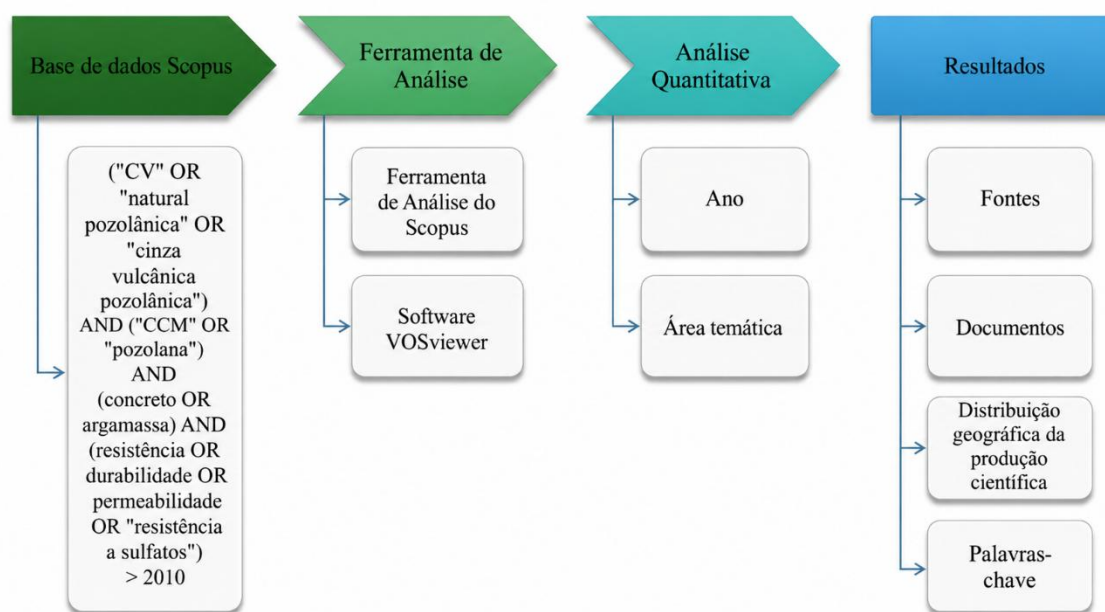


Figura 3. Metodologia de busca.

Fonte: elaboração própria.

3.6 Análise bibliométrica e análise técnica.

A análise bibliométrica e a síntese técnica foram desenvolvidas como componentes distintos. A análise bibliométrica foi aplicada ao conjunto completo de registros recuperados na Scopus, com o objetivo de identificar tendências de publicação, áreas temáticas, principais fontes, distribuição geográfica, colaboração científica e coocorrência de palavras-chave. Para essa análise, foram utilizados o VOSviewer e as ferramentas de exportação da Scopus.

A síntese técnica, por sua vez, foi limitada aos estudos que atenderam aos critérios de inclusão para a extração de dados sobre desempenho mecânico, durabilidade, caracterização físico-química e mecanismos pozolânicos. Portanto, os 422 registros iniciais não devem ser interpretados como o número de estudos incluídos na discussão técnica, mas sim como a base documental da análise

bibliométrica.

3.1 Limitações metodológicas.

O uso exclusivo da Scopus constitui uma limitação do estudo, uma vez que pode restringir a cobertura documental em comparação com revisões que integram bases complementares, como a Web of Science. Essa decisão foi adotada para manter a homogeneidade bibliométrica e a rastreabilidade dos metadados analisados; no entanto, os resultados devem ser interpretados considerando esse possível viés de cobertura. Da mesma forma, o estudo não foi registrado sob um protocolo PRISMA, nem foi concebido como uma meta-análise, devido à heterogeneidade dos estudos disponíveis quanto à origem das cinzas, composição química, finura, matrizes cimentícias, condições de cura, idades de ensaio e métodos de avaliação. Por essa razão, optou-se por uma revisão sistematizada com análise bibliométrica e síntese narrativa, orientada à identificação de tendências, mecanismos e limitações técnicas, em vez da estimativa de um tamanho de efeito estatístico.

Dado que o objetivo do artigo inclui discutir a aplicabilidade da cinza vulcânica no Equador, foi realizada uma busca complementar de caráter contextual, direcionada à identificação de literatura e documentos relacionados à atividade vulcânica, depósitos de cinzas, pozolanas naturais e materiais vulcânicos no contexto equatoriano. Essa busca não foi utilizada para compor a análise bibliométrica global, mas para subsidiar a discussão aplicada sobre oportunidades, restrições e necessidades de validação local (Figura 4).

Dessa forma, a revisão técnica foi fundamentada em evidências internacionais sobre o desempenho das cinzas vulcânicas como materiais cimentícios suplementares (SCM), enquanto o enfoque equatoriano foi incorporado como eixo de discussão contextual e de transferência tecnológica. A Figura 4 diferencia os dois componentes do estudo: a análise bibliométrica, aplicada aos 422 registros recuperados na Scopus, e a síntese técnica, desenvolvida com os 110 estudos finalmente incluídos.

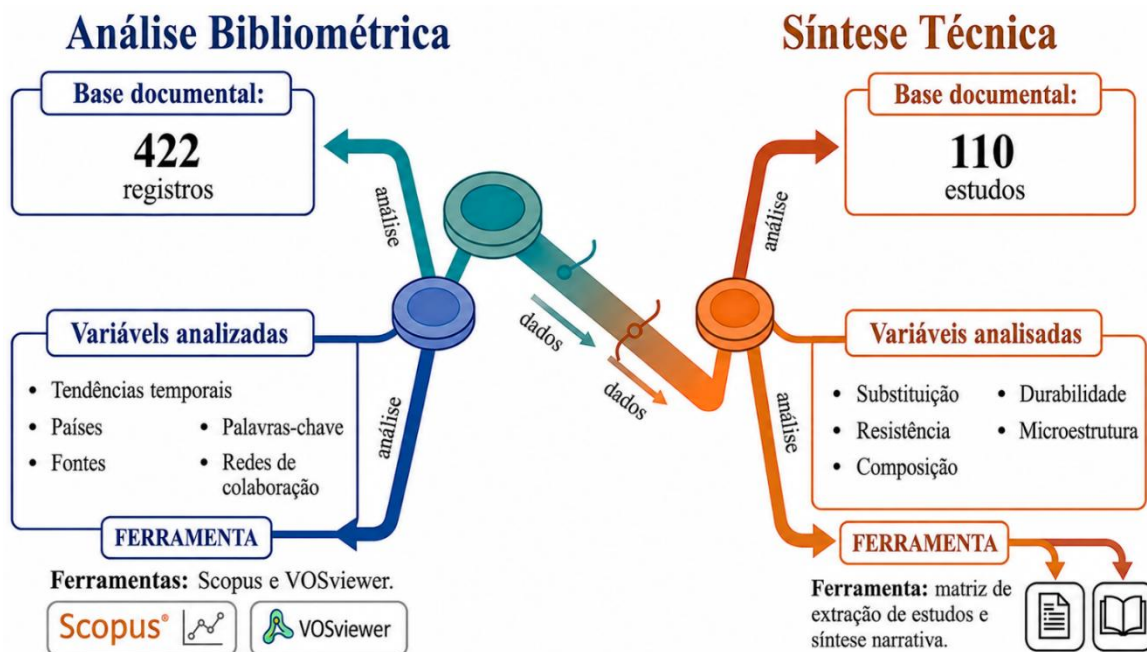


Figura 4. Diferenciação entre análise bibliométrica e síntese técnica.

Fonte: elaboração própria.

4. RESULTADOS

Os resultados são apresentados em dois níveis complementares. Em primeiro lugar, apresenta-se a análise bibliométrica dos registros recuperados na Scopus, com o objetivo de caracterizar a evolução temporal, as áreas temáticas, as fontes de publicação, a distribuição geográfica e as palavras-chave associadas ao estudo da cinza vulcânica e das pozolanas naturais como materiais cimentícios suplementares. Em segundo lugar, desenvolve-se a síntese técnica dos estudos selecionados para a extração de dados, com foco no desempenho mecânico, durabilidade, mecanismos pozolânicos, caracterização físico-química e viabilidade de aplicação. Portanto, os registros bibliométricos não devem ser interpretados como equivalentes ao número de estudos incluídos na discussão técnica.

4.1 Análise bibliométrica da produção científica identificada em Scopus.

4.1.1 Análise quantitativa.

O número de documentos por ano relacionados ao uso de cinza vulcânica e pozolanas naturais como materiais cimentícios suplementares é apresentado na Figura 5. A tendência geral evidencia um aumento contínuo do interesse científico entre 2011 e 2025, com crescimento mais acentuado a partir de 2015. Esse comportamento coincide com a intensificação das pesquisas sobre redução do fator clínquer, valorização de recursos minerais naturais e desenvolvimento de materiais cimentícios de menor impacto ambiental.

A Figura 5 mostra um primeiro aumento relevante em 2018, seguido por um crescimento mais acentuado até atingir o número máximo de publicações em 2022. Embora em 2023 e 2024 seja observada uma ligeira redução, a retomada do crescimento em 2025 indica que o tema mantém sua relevância científica. Essa evolução confirma que a cinza vulcânica não constitui uma linha de pesquisa marginal, mas sim um campo emergente na pesquisa sobre materiais cimentícios suplementares (SCM). No entanto, o aumento quantitativo das publicações não implica necessariamente maturidade tecnológica, uma vez que a aplicação industrial continua condicionada pela variabilidade físico-química do material, pela padronização dos ensaios e pela validação normativa.

A evolução temporal da produção científica é apresentada na Figura 5, na qual se observa um crescimento contínuo desde 2015 e o maior número de publicações nos anos mais recentes.

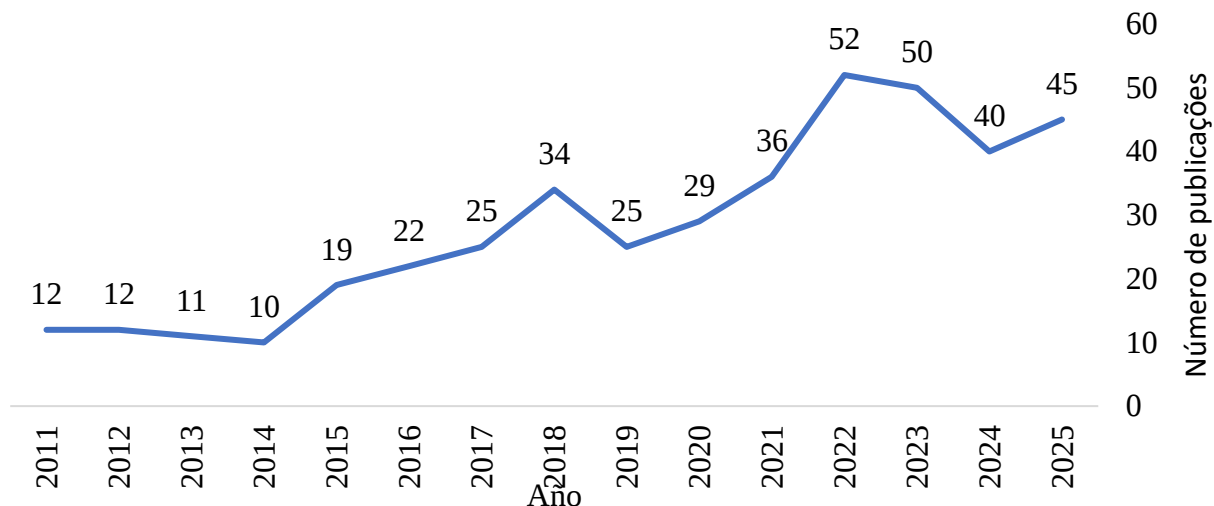


Figura 5. Evolução anual das publicações sobre cinza vulcânica e pozolanas naturais como SCM.

Fonte: elaboração própria a partir de dados exportados da Scopus.

A Figura 6 mostra que a maior parte da produção científica está concentrada nas áreas de Engenharia e Ciência dos Materiais, evidenciando a orientação predominantemente técnica do campo. Essa distribuição é coerente com o objetivo da revisão, centrado no desempenho mecânico, na durabilidade, na microestrutura e na viabilidade de utilização da cinza vulcânica em matrizes cimentícias. A presença de áreas complementares, como Ciências Ambientais, Engenharia Química e Ciências da Terra, confirma o caráter interdisciplinar do tema, especialmente por sua relação com sustentabilidade, caracterização mineralógica, redução dos impactos ambientais e valorização de recursos naturais. Conforme apresentado na Figura 6, a produção científica concentra-se principalmente em Engenharia e Ciência dos Materiais, seguida por Ciências Ambientais, Física e Astronomia e Ciências da Terra.

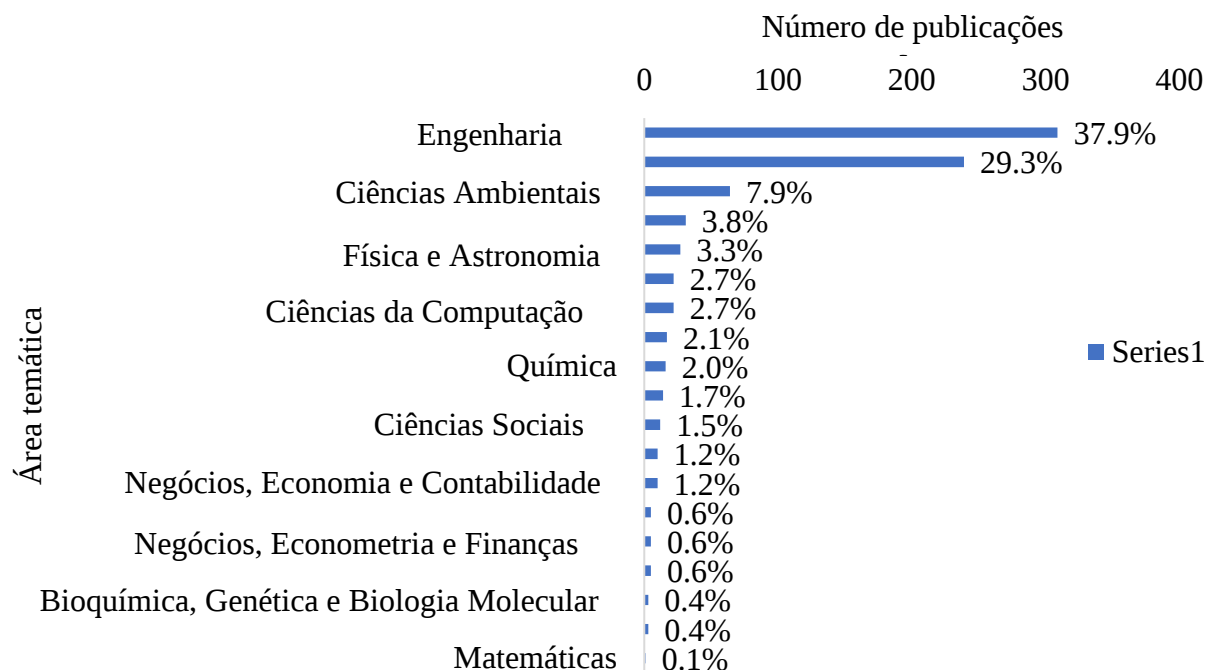


Figura 6. Número de publicações por área temática.
Fonte: elaboração própria a partir de dados exportados da Scopus.

4.1.2 Fontes de publicação

Os dados foram processados por meio do software VOSviewer, selecionando-se a opção “acoplamento bibliográfico” como tipo de análise. A unidade de análise foi definida como “fontes”, e estabeleceu-se um mínimo de 2 documentos para incluir um periódico na análise. Os principais periódicos que concentram a produção científica analisada são apresentados na Figura 7. *Construction and Building Materials* registra o maior número de documentos, seguido por *Materials* e outras fontes especializadas em materiais cimentícios e construção sustentável.

O gráfico inclui apenas as fontes que possuem quatro ou mais publicações. Portanto, 201 artigos adicionais, pertencentes a periódicos com menor frequência de publicação, não são apresentados no gráfico (Figura 8). Isso evidencia uma concentração significativa em poucos periódicos especializados e, ao mesmo tempo, uma dispersão considerável entre diversas fontes com um número reduzido de contribuições. A estrutura de relações entre as fontes é representada na Figura 8, obtida por meio de uma análise de acoplamento bibliográfico no VOSviewer. O tamanho de cada nó representa a produção documental do periódico, e os vínculos expressam a intensidade das relações bibliográficas entre as fontes.

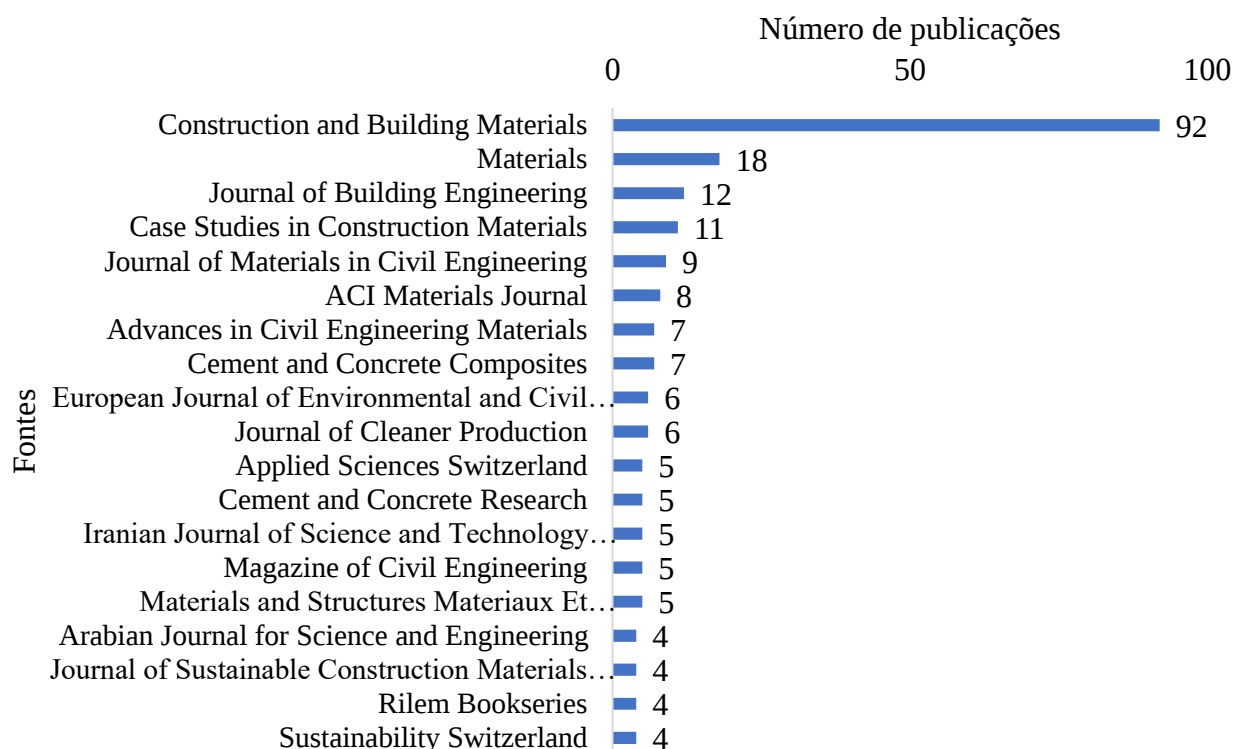


Figura 7. Principais fontes de publicação sobre cinza vulcânica e pozolanas naturais como SCM. Fonte: elaboração própria a partir de dados exportados da Scopus.

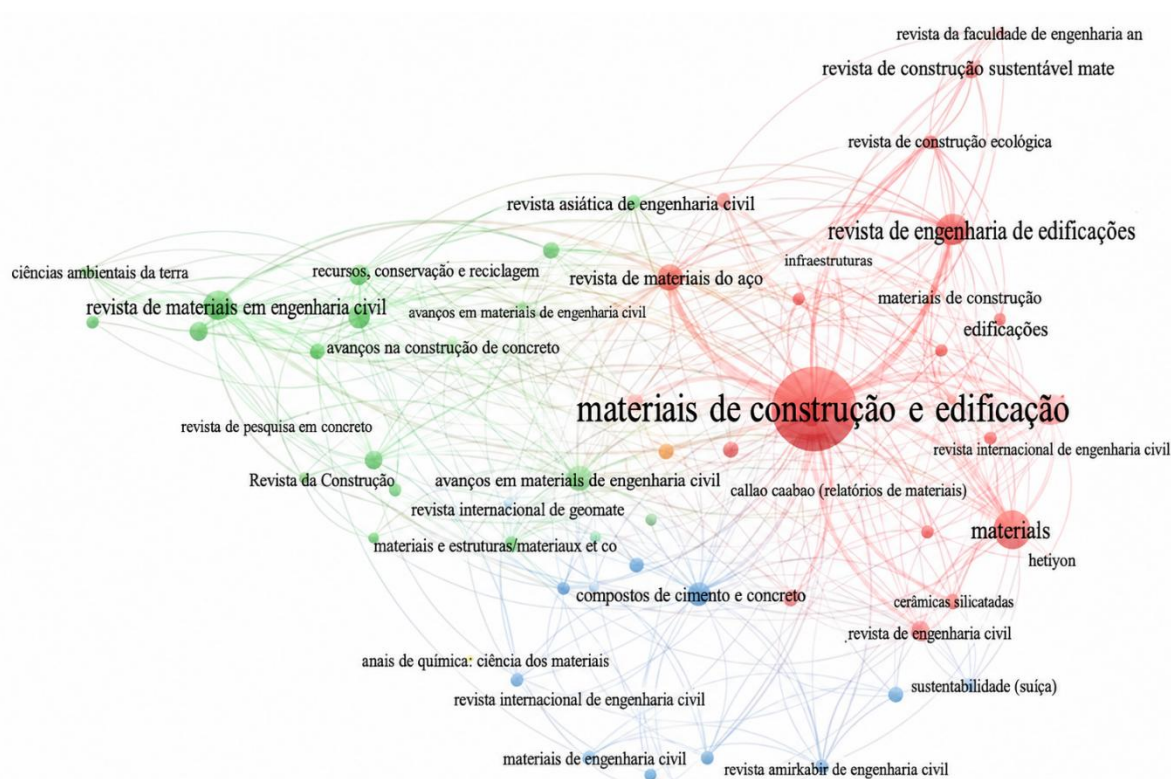


Figura 8. Rede de acoplamento bibliográfico entre fontes de publicação. Fonte: elaboração própria por meio do VOSviewer, a partir dos registros recuperados na Scopus.

A rede evidencia a formação de grupos temáticos associados a materiais cimentícios, engenharia civil e sustentabilidade. Alguns periódicos com menor número de documentos apresentam elevada influência dentro da rede, o que indica que a relevância bibliométrica não depende apenas do volume de publicações, mas também de suas conexões e do impacto dos documentos publicados.

4.1.3 Distribuição geográfica da produção científica

A análise por país evidencia uma concentração geográfica significativa da produção científica sobre cinza vulcânica e pozolanas naturais como SCM. Conforme observado na Figura 9, Arábia Saudita, Irã e Turquia estão entre os países com maior número de publicações, seguidos por China, Espanha, Grécia e Egito. Essa distribuição reflete a existência de grupos consolidados de pesquisa em regiões com tradição no estudo de pozolanas naturais, materiais cimentícios alternativos e durabilidade do concreto.

É importante esclarecer que a Figura 9 representa a produção científica por afiliação ou país de publicação, e não a disponibilidade geológica do recurso. Portanto, a baixa presença do Equador na produção bibliométrica não deve ser interpretada como ausência de cinza vulcânica, mas sim como uma lacuna de pesquisa aplicada. Essa distinção é relevante porque o potencial de utilização da cinza vulcânica como SCM depende não apenas de sua presença territorial, mas também de sua composição química, fase amorfa, finura, acessibilidade, logística, tratamento prévio e validação normativa. A distribuição geográfica da produção científica é apresentada na Figura 9. O mapa representa o número de publicações por país de afiliação dos autores, e não a disponibilidade de reservas ou depósitos de cinza vulcânica.

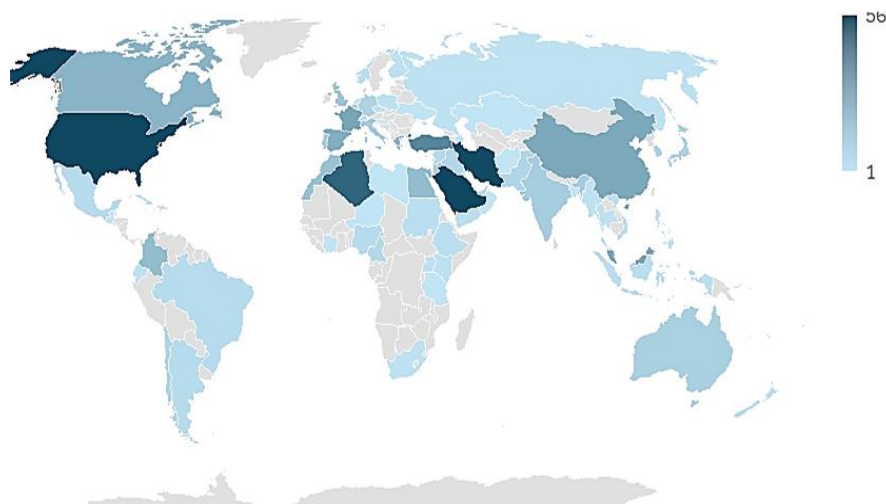


Figura 9. Distribuição geográfica da produção científica.

Fonte: elaboração própria a partir de dados exportados da Scopus.

A Figura 10 apresenta a rede de colaboração internacional gerada por meio do VOSviewer. O tamanho dos nós representa o volume relativo da produção científica, enquanto as conexões indicam relações de coautoria entre países. A presença de clusters regionais sugere que o desenvolvimento do conhecimento sobre a cinza vulcânica como SCM está associado a redes de pesquisa consolidadas, especialmente na Ásia, no Oriente Médio e na Europa. Para o Equador, essa análise bibliométrica evidencia uma oportunidade estratégica: fortalecer colaborações internacionais que permitam a transferência de metodologias de caracterização, avaliação da durabilidade e validação de misturas cimentícias com pozolanas naturais. A Figura 10 apresenta a rede internacional de coautoria. O tamanho dos nós representa a produção científica de cada país, enquanto as conexões mostram as relações de colaboração entre autores de diferentes países.

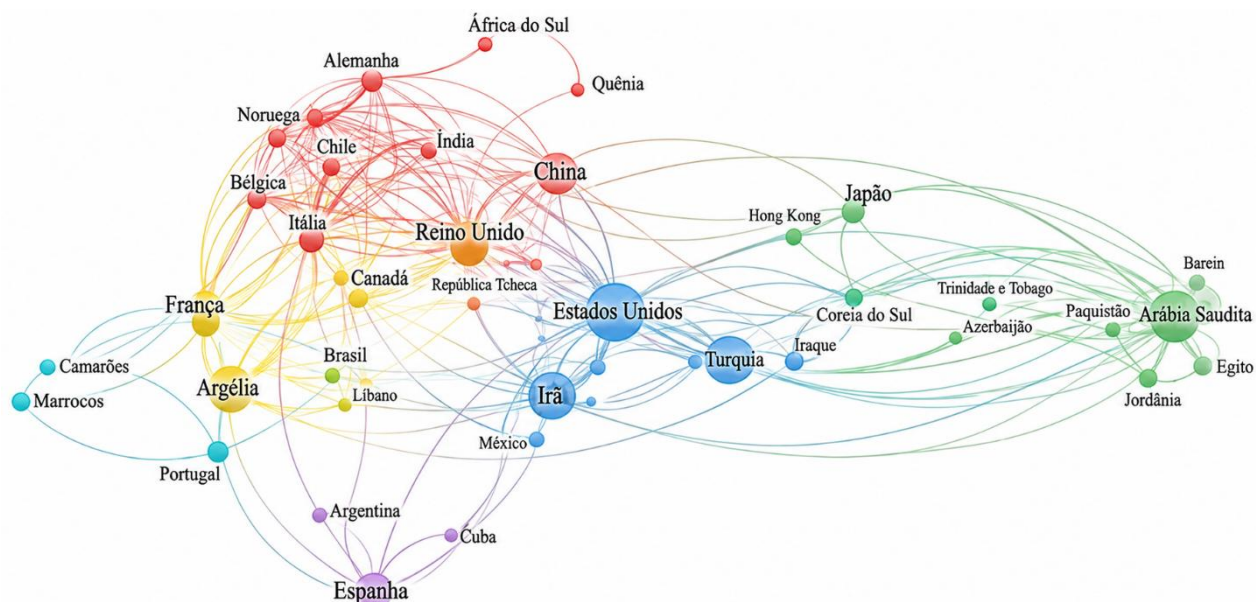


Figura 10. Visualização da rede de colaboração entre países.

Fonte: elaboração própria por meio do VOSviewer, a partir dos registros recuperados na Scopus.

4.1.4 Coocorrência de palavras-chave

O estudo de palavras-chave realizado com o VOSviewer incluiu a unificação de termos semelhantes, a fim de evitar duplicidades e representar com maior precisão os conceitos de maior destaque. A Figura 11 apresenta a rede de coocorrência de palavras-chave após a unificação de sinônimos e variantes terminológicas. Os principais núcleos temáticos estão relacionados ao desempenho mecânico, durabilidade, atividade pozolânica, caracterização química e sustentabilidade. A coocorrência de palavras-chave permitiu identificar os temas centrais relacionados ao uso da cinza vulcânica como material cimentício suplementar. A Figura 11 apresenta uma rede na qual se destacam termos associados ao desempenho mecânico, especialmente à resistência à compressão e à flexão, bem como à comparação da cinza vulcânica com outras pozolanas. Também se destacam conceitos relacionados ao cimento Portland e à durabilidade do material, como permeabilidade, resistência a cloretos e sulfatos e efeitos de congelamento e degelo. Além disso, aparecem termos relacionados à sua caracterização química e mineralógica, evidenciando o interesse em sua reatividade pozolânica. Por fim, a presença de palavras associadas a geopolímeros, ativação alcalina e pegada de carbono indica sua relevância em pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais mais sustentáveis.

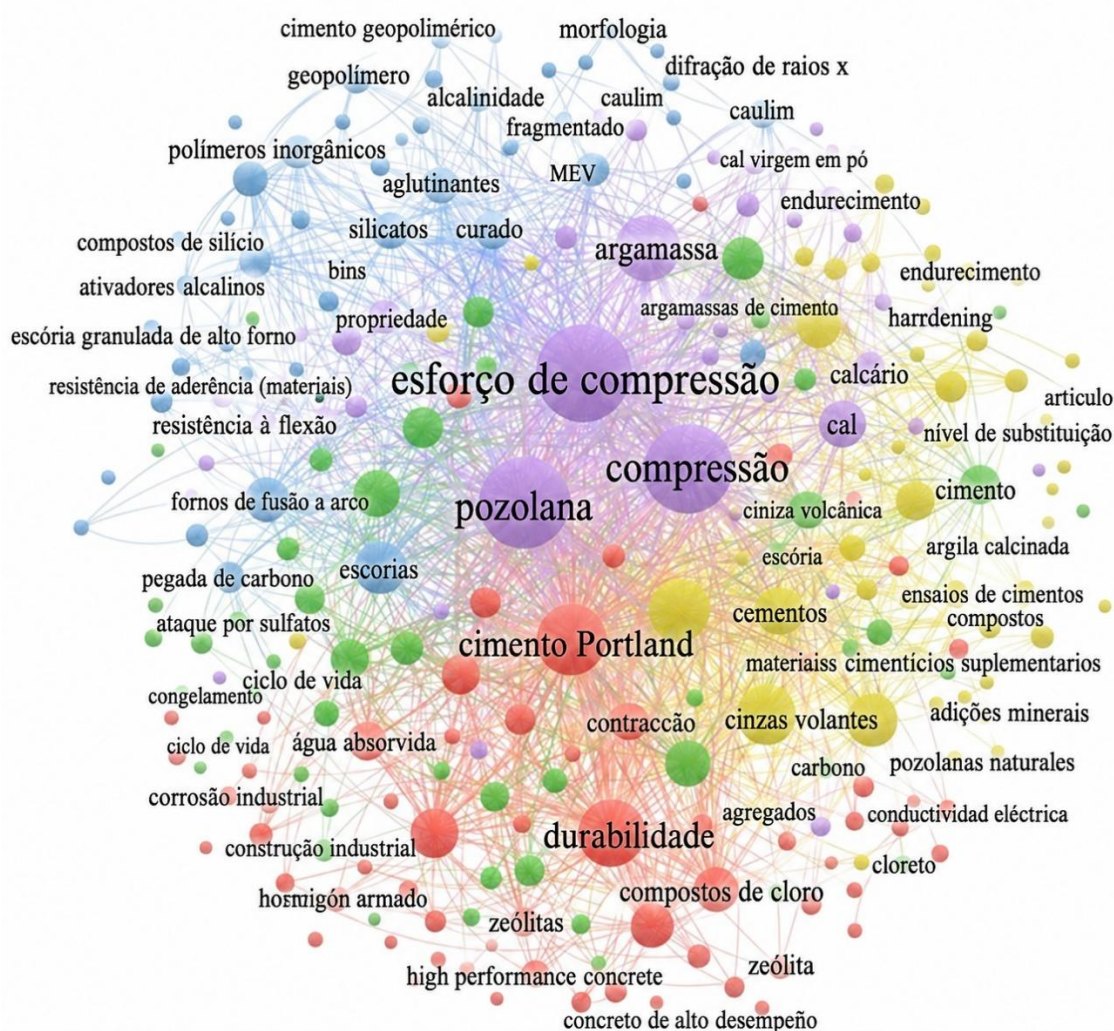


Figura 11. Visualização sobreposta de palavras-chave por cluster.

Fonte: elaboração própria por meio do VOSviewer, a partir dos registros recuperados na Scopus.

Nota: As palavras-chave são mantidas em inglês, conforme foram recuperadas e indexadas na Scopus e processadas no VOSviewer, com o objetivo de preservar a rastreabilidade, a correspondência terminológica e a reprodutibilidade da análise bibliométrica.

4.2 Desempenho mecânico e fatores que controlam a reatividade da cinza vulcânica

O desempenho mecânico de argamassas e concretos com cinza vulcânica não depende apenas do percentual de substituição do cimento, mas da interação entre composição química, fração amorfa, finura, tamanho das partículas, superfície específica, disponibilidade de portlandita e condições de cura. Esses fatores controlam a velocidade e a magnitude da reação pozolânica. Em particular, o teor de SiO_2 e Al_2O_3 reativos, juntamente com a fração amorfa, condiciona a capacidade da cinza de reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado pela hidratação do cimento Portland. A finura e a superfície específica aumentam a área de contato e podem favorecer tanto o efeito fíler quanto a nucleação dos produtos de hidratação. Como resultado, quando há quantidade suficiente de cálcio disponível na matriz, promove-se a formação secundária de géis C-S-H e C-A-S-H, responsáveis pelo refinamento da estrutura porosa, densificação da matriz e melhoria do desempenho mecânico e da durabilidade. Por outro lado, elevados teores de substituição podem reduzir a quantidade de clínquer hidratável, limitar a disponibilidade de portlandita e intensificar o efeito de diluição, deixando frações de cinza parcialmente sem reagir (Khan et al., 2019, 2022; S. Singh et al., 2026). As evidências revisadas mostram que os teores de cinza vulcânica entre 10% e 20% geralmente

oferecem o equilíbrio mais favorável entre resistência inicial, resistência em idades avançadas e trabalhabilidade. Nesse intervalo, a cinza vulcânica pode atuar simultaneamente por meio do efeito físico de preenchimento, da nucleação de produtos de hidratação e da reação pozolânica, favorecendo a formação secundária de C-S-H e C-A-S-H. Esses produtos contribuem para o refinamento da rede porosa, a densificação da matriz, a redução da conectividade capilar e o desenvolvimento da resistência mecânica a médio e longo prazo (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Lo et al., 2009; Özen & Uzal, 2021). Nesses teores, a reação pozolânica da CV favorece a formação adicional de géis C-S-H e C-A-S-H, densificando a microestrutura e melhorando a durabilidade (Y. Cao et al., 2025; Jackson et al., 2017; Wei et al., 2005). Em teores moderados de substituição (5–10%), observam-se inclusive aumentos simultâneos de resistência, durabilidade e trabalhabilidade (Hossain, 2005; Shahjalal et al., 2025), enquanto substituições superiores a 20–30% tendem a reduzir a resistência inicial e a trabalhabilidade, devido à diluição do cimento e à reação incompleta da CV (Edris et al., 2021; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021). No entanto, em níveis elevados de substituição (>30%), a resistência a longo prazo pode ser mantida ou até mesmo aumentada por meio de métodos de ativação e misturas sinérgicas com outros subprodutos (escórias, outros materiais cimentícios suplementares e nanoaditivos), bem como com regimes de cura otimizados (Ababneh et al., 2024; Bawab et al., 2024; Díaz et al., 2013; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021). A finura, a composição química e o teor de fase amorfa da CV são fatores-chave que controlam sua reatividade e seu efeito sobre a resistência (M. Cao & Zhang, 2023; Hazarika et al., 2025; Kupwade-Patil, Tyagi, et al., 2016; Masmoudi et al., 2017). Além disso, em ambientes agressivos, como ambientes marinhos ou sob altas temperaturas, os concretos com 10–20% de CV apresentam melhor desempenho mecânico residual e maior durabilidade em comparação com o cimento Portland convencional (A Lachemi, 2004; Anwar Hossain, 2006; Demirel & Keleştemur, 2010; Jackson et al., 2017; Wahyuni et al., 2025). De modo geral, a literatura sustenta que a CV é um SCM eficaz para melhorar a resistência à compressão quando dosada dentro de faixas ótimas e quando sua ativação e cura são adequadamente controladas (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021). Em conjunto, a literatura sustenta que a cinza vulcânica pode melhorar a resistência à compressão quando incorporada em faixas adequadas de substituição e quando sua reatividade, finura e condições de cura são devidamente controladas. A Tabela 1 sintetiza, de forma comparativa, os principais efeitos do teor de cinza vulcânica sobre a resistência inicial, a resistência a longo prazo e a trabalhabilidade.

Tabela 1. Efeito do teor de cinza vulcânica sobre a resistência à compressão.

Contenido de CV (% de reemplazo) Teor de CV (% de substituição)	Resistencia a edades tempranas Resistência em idades iniciais	Resistencia a largo plazo Resistência a longo prazo	Trabajabilidad Trabalhabilidade	Efectos de activación / mezclas Efeitos da ativação / misturas
5–10	Comparable / ↑ Comparável / ↑	↑	↑	Melhor para trabalhabilidade e durabilidade (A Lachemi, 2004; Hossain, 2005; Bashir & Elahi, 2023; Bawab et al., 2025b; Dahiru et al., 2019; Klausen et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Uzbaş & Aydın, 2019)
10–20	Ligera ↓ / ≈ Leve ↓ / ≈	↑	≈	Ótimo para resistência e trabalhabilidade (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Lo et al., 2009)

20–30	↓	≈ / ↑	↓	Requer ativação ou misturas sinérgicas (Hasan et al., 2024; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021)
>30	↓↓	≈ / ↑ (com ativação)	↓↓	Misturas sinérgicas e ativação essenciais (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Khan et al., 2022; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Uzbaş & Aydın, 2019; Zhou et al., 2021; Zhuginissov et al., 2026)

Legenda: ↑ = Melhorado; ↓ = Reduzido; ≈ = Comparável ao controle.

Fonte: elaboração própria a partir das evidências científicas citadas em cada intervalo de substituição.

4.2.1 Variabilidade química e física da cinza vulcânica.

A variabilidade química e física da cinza vulcânica constitui um dos fatores que mais condicionam seu desempenho como SCM. Diferentemente de materiais industriais mais controlados, as cinzas vulcânicas podem apresentar diferenças significativas nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , álcalis, perda ao fogo, fase amorfa, fases cristalinas, finura, tamanho das partículas e superfície específica. Essa variabilidade explica por que as faixas ótimas de substituição relatadas na literatura não podem ser generalizadas sem a caracterização prévia do material.

Do ponto de vista químico, as cinzas com maior proporção de fases silicoaluminosas amorfas tendem a apresentar maior potencial pozolânico, desde que haja quantidade suficiente de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível na matriz cimentícia. Nesses casos, a reação com a portlandita pode favorecer a formação de C-S-H e C-A-S-H, produtos responsáveis pela densificação microestrutural. Por outro lado, cinzas com elevado teor de fases cristalinas, baixa finura ou fração reativa limitada podem atuar predominantemente como fíler, proporcionando benefícios físicos, porém com menor contribuição química para o desenvolvimento da resistência. A variabilidade química e física identificada nos estudos revisados é apresentada na Tabela 2. As informações foram extraídas dos artigos originais e organizadas de forma comparativa para demonstrar as diferenças na composição química, mineralogia, finura, tamanho das partículas e superfície específica das cinzas vulcânicas avaliadas.

Tabela 2. Variabilidade química e física da cinza vulcânica.

Autor / ano	País ou fonte do material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O + K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Perda ao fogo (%)	Fase amorfa / mineralogia relatada	Finura / tamanho das partículas (D50, percentual retido ou peneira)	Superfície específica (m ² /kg ou m ² /g, método de Blaine)	Aplicação avaliada
(K. M. A. Hossain, 2003)	Papua Nova Guiné (Mt. Tavurvur)	59.34	17.54	7.06	6.12	2.55	5.83	0.7	1.03	—	Retenido tamiz 75 µm: 42%	242 m ² /kg	Cimento composto, argamassa e concreto
(Hazarika et al., 2025)	Islândia (VM 1)	43.8	14.6	13.3	11.95	7.44	2.24	—	-0.51	Albita, Anortita, Andesina, Oligoclase	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reatividade MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islândia (VM 2)	47	12.75	17.2	9.31	4.92	3.96	—	-0.7	Albita, Anortita, Andesina, Oligoclase	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reatividade MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islândia (VM 3)	65.6	14.9	7.7	3.62	0.83	6.71	—	1.44	Olivino, Albita, Oligoclase	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reatividade MR3 (SCM)
(Hazarika et al., 2025)	Islândia (VM 4)	61.7	14.05	6.04	6.61	2.86	5.35	—	2.45	Albita, Anortita, Oligoclase	D50: 9 - 37 µm	4 - 13 m ² /g (BET)	Reatividade MR3 (SCM)
(Flores Medina et al., 2015)	Pozzolana Natural	55	15.9	4.2	2.2	1.5	9.5	—	11.2	—	—	—	Concreto

(Edris et al., 2021)	Jordânia (Norte)	34.39	4.59	31.5	24.11	0.49	1.30 (K ₂ O)	—	—	Tufo vulcânico	< 75 µm	—	Concreto
(Demirel & Keleştemur, 2010)	Turquia (Mt. Meryem)	49.52	16.72	11.3	8.26	4.54	—	—	1.68	Pedrapomes	—	—	Concreto
(Amine et al., 2017)	Pozolana 1 (Pz1)	49.5	18	10	7.5	5.5	7	0.1	1.6	—	—	—	Adição mineral
(al-Swaidani et al., 2016)	Síria (Dirat-at-Tulul)	46.52	13	11.4	10.1	9.11	2.91	0.3	2.58	Escória; Olivina, Plagioclásio, Vidro	D50: 17.5 µm (inter-molido)	3200 cm ² /g	Argamassa e concreto
(Dahiru et al., 2019)	Nigéria (Jos Plateau)	28.1	18	35.1	0.29	0.26	0.28	—	15.9	—	< 75 µm	—	Concreto
(Zunino & Scrivener, 2024)	Pozolana Natural (NP)	68.97	13.92	2.09	1.51	0.73	7.01	0.1	4.27	—	—	2.89 m ² /g (BET)	Pasta de cimento com baixo teor de clínquer
(Letelier et al., 2018)	Chile (V. Calbuco)	57.76	14.54	11	8.27	2.44	4.55	—	—	Vidro vulcânico (~57%)	< 75 µm	285 m ² /kg	Concreto
(Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016)	Arábia Saudita (Basalto)	38.89	13	12.4	9.09	6.16	4.43	0.1	1.8	Fase amorfa: 71.7%; Anortita, Forsterita	D50: 10.0 µm; Media: 17.14 µm	—	Pasta de cimento

(Djon Li Ndjock et al., 2017)	Camarões (P1)	40.1	16.3	13.5	6.3	5.3	1.3	—	11.1	Amorfo: 42.5%; Muscovita, Hematita	—	7319 cm ² /g	Geopolímero
(Hossain, 2005)	México	68.2	11.2	1.8	1	0.2	0.20 (Na ₂ O)	0	—	—	—	—	Concreto marinho
(Jackson et al., 2017)	Itália (Neapolitano)	38.9 - 60.2	18.6 - 30.7	—	0.4 - 10.7	0.0 - 0.2	7.9 - 19.0	—	—	Phillipsita (Zeólita)	—	—	Cimento mineral
(Jubera-Pérez et al., 2024)	Espanha (La Palma)	38.2	14.1	18.6	11.2	6.5	4.5	0.2	—	Amorfo: 63.5 - 72.5%	D: 23, 28 y 45 µm	—	Argamassa (SAI)
(Yu et al., 2015)	China (Jiangxi - NQ)	74.81	11.15	1.87	1.39	0.16	7.72	—	1.71	Amorfo: 76.8%; Quartzo, Labradorita	90% < 45 µm	—	Argamassa
(Zeyad et al., 2023)	VPD (Pó de pedrapomes)	48.06	16.83	7.63	12.52	6.59	3.65	0.3	1.61	Quartzo, fase amorfa aluminossilicada	1.0 - 15 µm	4090 cm ² /g	Concreto
(Keshta et al., 2022)	Egipto (Wadi El-Anbgy)	67.04	14.9	2.59	3.27	1.72	6.54	0.3	2.83	—	Pasa tamiz #170	—	Concreto
(Martín-Rodríguez et al., 2024)	Espanha (La Palma)	41.56	14.49	14.7	11.92	5.57	5.96	0.2	—	Diópsido, Augita, Magnetita, Bytownita	96% < 45 µm; 91% < 32 µm	—	Cimento híbrido e alcalino

Fuente: elaboración propia a partir de los datos reportados en los estudios citados en la primera columna.

Nota: VM1–VM4, MR3 y Pz1 corresponden a los códigos de identificación empleados por los autores de los estudios originales; “—” indica información no reportada.

4.3 Efeito sobre a resistência à flexão.

As evidências científicas mostram que a resistência à flexão do concreto e da argamassa com cinza vulcânica (CV) depende fortemente do percentual de substituição do cimento. De forma consistente, os estudos concordam que as faixas de substituição entre 10–20%, sendo 15% o valor mais frequente, permitem maximizar a resistência à flexão, com aumentos significativos em relação às misturas de controle (Al-Swaidani, 2017; Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006; Keshta et al., 2022; Shahjalal et al., 2025). Esse comportamento é atribuído à reação pozolânica da CV, que gera géis adicionais de C-S-H e C-A-S-H, promovendo a densificação da matriz cimentícia e o refinamento da zona de transição interfacial (ITZ) (Bawab et al., 2024; Khan et al., 2022; Nováková et al., 2024; Peng et al., 2024; Wang et al., 2025). Em teores de substituição superiores a 20%, a resistência tende a se estabilizar ou diminuir, principalmente devido aos efeitos de diluição do cimento e à reação pozolânica incompleta, embora a cura prolongada possa atenuar parcialmente essa perda (Ali et al., 2023; Anwar Hossain, 2006; Hasan et al., 2024; Keshta et al., 2022; Mohamad et al., 2020; Zeyad et al., 2023; Zhuginissov et al., 2026).

Da mesma forma, a finura da cinza vulcânica e os métodos de ativação desempenham um papel determinante: partículas mais finas e tratamentos físicos ou químicos aumentam a reatividade e favorecem a resistência à flexão (al-Swaidani et al., 2016; Begaye et al., n.d.; Khan et al., 2019; Khan & Amin, 2017; J. Liu et al., 2017; L. P. Singh et al., 2017; Xiong et al., 2022; Zhang et al., 2025). No entanto, elevados teores de CV afetam a trabalhabilidade e o tempo de pega, especialmente acima de 25–35% de substituição (Bawab et al., 2024, 2025b; Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003), o que requer o uso de aditivos e estratégias de pré-tratamento (Keshta et al., 2022; Ogunbode & Hassan, 2011; Zhang et al., 2025).

A Tabela 3 sintetiza a influência do percentual de substituição por cinza vulcânica sobre a resistência à flexão de argamassas e concretos. As evidências analisadas indicam que os maiores incrementos geralmente são alcançados no intervalo de 10–15%, enquanto teores superiores a 25–35% tendem a reduzir o desempenho devido ao efeito de diluição e à menor disponibilidade de produtos de hidratação.

Tabela 3. Efeito da substituição por cinza vulcânica (CV) na resistência à flexão de argamassas e concretos.

Percentual de substituição de CV	Tendência da resistência à flexão	Mecanismo dominante	Efeito na trabalhabilidade e/pega	Referências
0% (controle)	Valor de referência	Hidratação normal do cimento	Normal	(Al-Swaidani, 2017; Hasan et al., 2024)
5%	↑ Incremento moderado (até +15–17%)	Micropreenchimento e ativação inicial	Leve redução	(Shahjalal et al., 2025; L. P. Singh et al., 2017)
10%	↑↑ Alto incremento	Formação ótima de C-S-H e C-A-S-H, refinamento da ITZ	Aceitável	(Al-Swaidani, 2017; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006; Shahjalal et al., 2025)
15%	↑↑ Máximo incremento (ótimo)	Densificação da matriz e da ITZ	Leve redução	(Al-Swaidani, 2017; Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006)
20%	↑ / ↔	Benefício	Redução	(Bawab et al., 2024;

	Estabilização	pozolânico máximo com início do efeito de diluição	moderada	Hasan et al., 2024; A. Hossain et al., 2006)
25–35%	↓ Redução	Diluição do cimento e hidratação incompleta	Redução significativa	(Ali et al., 2023; Hasan et al., 2024; Zeyad et al., 2023)
>40%	↓↓ Redução severa	Diluição excessiva e baixa reatividade	Pega lenta e baixa trabalhabilidade	(Bawab et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003)

Fonte: elaboração própria a partir da evidencia científica citada em cada intervalo de substituição.

Nota: ↑ indica incremento; ↓ indica diminuição; ↔ indica comportamento estável em relação à mistura de controle.

4.4 Estratégias de otimização para ampliar o uso de cinza vulcânica.

Para ampliar o uso de cinza vulcânica além das faixas convencionais de substituição, não basta aumentar sua dosagem. É necessário otimizar seu desempenho por meio de estratégias de beneficiamento e de dosagem das misturas. A moagem controlada pode aumentar a superfície específica e acelerar a reação pozolânica, embora deva ser equilibrada com a demanda de água, a compatibilidade com aditivos superplastificantes e o potencial aumento do consumo energético associado ao processamento do material. A classificação granulométrica permite reduzir a presença de partículas grossas de baixa reatividade e melhorar o efeito fíler, enquanto a ativação térmica ou química pode aumentar a disponibilidade de fases reativas. No entanto, essas estratégias devem ser avaliadas com base em critérios técnicos, energéticos, econômicos e ambientais, uma vez que tratamentos intensivos podem reduzir parte dos benefícios associados à diminuição do teor de clínquer (Khan et al., 2022; J. Rajesh & Kandasamy, 2025; Zhao et al., 2018).

Outra estratégia consiste em formular sistemas binários ou ternários que combinem cinza vulcânica com outros SCM ou com cimentos de diferentes composições, buscando equilibrar a disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o teor de alumina reativa, o refinamento da estrutura porosa e o desempenho mecânico. Essas alternativas podem permitir maiores reduções do fator clínquer sem comprometer a durabilidade; no entanto, requerem validação experimental específica para cada fonte de cinza, especialmente em contextos como o Equador, onde a variabilidade mineralógica e as condições logísticas influenciam a padronização do material (Bawab et al., 2024; de Siqueira & Cordeiro, 2022; Rodrigues et al., 2022).

4.5 Impacto na durabilidade: resistência aos sulfatos.

A incorporação de cinza vulcânica (CV) melhora significativamente a resistência do concreto e da argamassa ao ataque por sulfatos, principalmente devido à sua atividade pozolânica, que reduz o teor de hidróxido de cálcio e refina a estrutura porosa, limitando a penetração de íons sulfato e a formação de etringita expansiva (Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025). Os teores ótimos de substituição situam-se entre 10–20%, faixa na qual se alcança um equilíbrio adequado entre resistência mecânica inicial e durabilidade a longo prazo, embora teores de até 40% possam ser utilizados quando se prioriza o desempenho frente ao ataque por sulfatos em detrimento da resistência inicial (Das Gupta et al., 2025; A. Hossain et al., 2006; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018).

Do ponto de vista microestrutural, a CV reduz a porosidade, aumenta a velocidade de pulso ultrassônico e densifica a matriz cimentícia, dificultando a difusão de sulfatos e a expansão interna

(Al-jabali et al., 2025). Além disso, o consumo de aluminatos reativos e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduz a nucleação e o crescimento da etringita, diminuindo a microfissuração (Amine et al., 2017; Bawab et al., 2025a; Khan et al., 2022; Rols et al., 2000; Souza et al., 2023; Zunino & Scrivener, 2025). A finura e o teor de fase amorfa da CV influenciam de maneira decisiva sua eficácia, uma vez que partículas mais finas e com maior teor de fase amorfa aceleram a reação pozolânica e potencializam a resistência ao ataque por sulfatos (Djon Li Ndjock et al., 2017; Jaturapitakkul et al., 2007; Jubera-Pérez et al., 2024; Shahjalal et al., 2025; Suraneni et al., 2019; Yu et al., 2015). Em condições de exposição ambiental severa, como ciclos de umedecimento e secagem, a CV mantém melhor desempenho do que o cimento Portland convencional, especialmente em teores de substituição de 20–30% (Gao et al., 2010; Omikrine Metalssi et al., 2024). Em conjunto, as evidências sustentam que a CV é um material altamente eficaz para aumentar a durabilidade do concreto em ambientes com presença de sulfatos, desde que sejam otimizados sua dosagem, finura e regime de cura (Al-jabali et al., 2025; Bawab et al., 2025b; Das Gupta et al., 2025; Hasan et al., 2024; Kiran Kumar et al., 2024; Nair & Viswanathan, 2023; Wang et al., 2023). Os teores de substituição de 10–20% demonstraram ser particularmente eficazes para melhorar essa propriedade, embora também tenham sido relatados bons desempenhos com teores de até 40% (K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; Sideris & Savva, 2001). O desempenho da CV nesse aspecto é comparável e até mesmo superior ao de outros SCM convencionais (Khan et al., 2022; Siddique, 2012).

4.6 Impacto na durabilidade: permeabilidade.

A permeabilidade, que mede a facilidade com que fluidos e agentes agressivos (como água e cloretos) podem penetrar no concreto, é um indicador fundamental de sua durabilidade. A incorporação de cinza vulcânica (CV) como substituição parcial do cimento reduz significativamente a permeabilidade do concreto, principalmente devido ao refinamento da estrutura porosa e à densificação da matriz decorrentes de sua reação pozolânica (A Lachemi, 2004; Darwis et al., 2018; Edris et al., 2021; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Vedalakshmi et al., 2003). Os resultados mais consistentes são relatados em faixas de 10–20% de substituição, nas quais são alcançados os menores valores de absorção e permeabilidade, juntamente com uma melhoria substancial da resistência à penetração de cloretos, com reduções de até 80–90% na difusividade (Altimari et al., 2025; Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021; Ibrahim et al., 2025). Para teores mais elevados (20–40%), a permeabilidade continua diminuindo, embora com perdas de resistência inicial, sendo esses níveis adequados quando se prioriza a durabilidade a longo prazo em detrimento do desempenho mecânico inicial (Al-Swaidani, 2017; Anwar Hossain, 2006; A. Hossain et al., 2006; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007). No entanto, substituições superiores a 40% podem gerar maior porosidade e presença de cinza não reagida, comprometendo tanto a resistência mecânica quanto o desempenho frente à carbonatação (Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008). Do ponto de vista microestrutural, a CV reduz a conectividade dos poros, diminui o diâmetro predominante dos poros e favorece a formação de produtos pozolânicos (C-S-H, Al-tobermorita, phillipsita), o que limita o transporte de água e cloretos (Elshinawy et al., 2025; A. Hossain, n.d.; Hu & Du, 2013; Jackson et al., 2017; Játiva et al., 2025; Vedalakshmi et al., 2003). A finura, a origem e a ativação da CV influenciam diretamente sua eficácia, sendo observados melhores resultados com cinzas finas e com elevado teor de fase amorfa (Khan et al., 2019; Mitrović, 2011). A formação de sal de Friedel contribui adicionalmente para a imobilização de cloretos (A Lachemi, 2004; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; J. C. Liu et al., 2023; Tomoyose et al., 2020). Em ambientes agressivos, como zonas marinhas ou submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, os concretos com CV apresentam desempenho superior ao cimento Portland convencional (Ho et al., 2023; A. Hossain, n.d.). No entanto, em elevados níveis de substituição, o aumento da profundidade de carbonatação constitui uma limitação que deve ser

mitigada por meio de dosagem otimizada da mistura, cura adequada e uso combinado com outros SCM ou nanoaditivos (Flores Medina et al., 2015; A. Hossain et al., 2006; Ibrahim et al., 2025). Em conjunto, as evidências confirmam que a CV é altamente eficaz para melhorar a impermeabilidade do concreto quando dosada dentro de faixas ótimas e sob condições adequadas de cura (Kupwade-Patil, Palkovic, et al., 2018; Sharfuddin Ahmed et al., n.d.; Vedalakshmi et al., 2003). Os efeitos identificados sobre a durabilidade estão resumidos na Tabela 4. Em termos gerais, os teores entre 10% e 20% apresentam os resultados mais favoráveis em relação à permeabilidade, à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos; no entanto, o desempenho depende da composição e da finura da cinza, das condições de cura e do ambiente de exposição. Em níveis elevados de substituição, a menor reserva alcalina pode aumentar o risco de carbonatação.

Tabela 4. Resumo dos efeitos na durabilidade.

Propriedade	Faixa ótima de CV	Efeito principal	Mecanismo dominante	Límite técnico	Referências
Resistência a sulfatos	10–20% / até 40% em certos casos	Menor expansão e maior durabilidade	Refinamento da estrutura porosa, consumo de portlandita e menor formação de produtos expansivos	Depende dos aluminatos, da cura e da composição da cinza	(Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025; A. Hossain et al., 2006; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2004; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Sideris & Savva, 2001)
Microestrutura em ambientes com sulfatos	10–30%	Matriz mais densa e menor microfissuração	Refinamento dos poros e consumo de aluminatos		(Al-jabali et al., 2025; Amine et al., 2017; Bawab et al., 2025a; Khan et al., 2022; Rols et al., 2000; Souza et al., 2023; Zunino & Scrivener, 2025)
Permeabilidade à água	10–20%	Redução de permeabilidade	Densificação e menor conectividade capilar	Pode aumentar a demanda de água se a cinza for muito fina	(A Lachemi, 2004; Darwis et al., 2018; Edris et al., 2021; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Vedalakshmi et al., 2003)
Difusão de cloretos	10–20%	Menor penetração de cloretos	Refinamento da estrutura porosa e possível	Requer avaliação da relação Al_2O_3 /fases	(Altimari et al., 2025; Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021;

			fixação química	AFm	Ibrahim et al., 2025; J. C. Liu et al., 2023; Tomoyose et al., 2020)
Ambientes agressivos (marinhos, ciclos úmido–seco)	20–30% em alguns sistemas	Melhor desempenho a longo prazo	Cura prolongada e matriz refinada	Não extrapolar sem caracterização local	(Hossain, 2005; Gao et al., 2010; Ho et al., 2023; Omikrine Metalssi et al., 2024)
Elevados teores de substituição	>40%	Aumento da porosidade e da carbonatação	Cinza não reagida e efeito de diluição		(Flores Medina et al., 2015; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008)

Fonte: elaboração própria a partir dos estudos citados para cada propriedade avaliada.

Embora as faixas moderadas de substituição apresentem o melhor equilíbrio entre propriedades mecânicas e durabilidade, sua contribuição para uma redução significativa do fator clínquer continua sendo limitada. Por esse motivo, a Tabela 5 apresenta uma interpretação crítica das faixas de substituição, relacionando o desempenho técnico esperado ao seu potencial de redução do fator clínquer, aos riscos associados e às estratégias de otimização necessárias.

Tabela 5. Interpretação crítica das faixas de substituição frente à redução do fator clínquer.

Faixa de substituição	Desempenho técnico esperado	Contribuição para a redução do fator clínquer	Principal risco	Estratégia de otimização
5–10%	Melhoria moderada devido ao efeito fíler e à nucleação	Baixa	Impacto ambiental limitado	Utilizar em cimentos convencionais sem grandes alterações
10–20%	Melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e durabilidade	Moderada	Depende da reatividade e da cura	Controle da finura e caracterização química
20–30%	Maior potencial ambiental	Media-alta	Menor resistência inicial	Moagem, cura prolongada e aditivos
30–40%	Possível em sistemas otimizados	Alta	Falta de portlandita e efeito de diluição	Sistemas ternários, ativação e cimentos adequados
>40%	Alto potencial	Muito alta	Baixa resistência	Validação

	ambiental, porém com desempenho dependente da ativação e da dosagem da mistura		inicial, cinza não reagida e possível aumento da carbonatação devido à menor reserva alcalina	experimental rigorosa; não recomendada de forma generalizada
--	--	--	---	--

Fonte: elaboração própria a partir da síntese crítica dos resultados relatados nos estudos incluídos.

Como se observa na Tabela 5, os teores entre 10% e 20% oferecem o equilíbrio técnico mais favorável, embora seu impacto na redução do fator clínquer seja moderado. As substituições entre 20% e 40% apresentam maior potencial ambiental, porém requerem controle da finura, cura prolongada, aditivos ou sistemas ternários para compensar a menor resistência inicial e a redução da portlandita disponível. Acima de 40%, o uso de cinza vulcânica não pode ser recomendado de forma generalizada, devido ao risco de diluição, presença de partículas não reagidas e maior suscetibilidade à carbonatação.

5. DISCUÇÃO DOS RESULTDOS

5.1 Análise dos achados.

Os resultados bibliométricos evidenciam que o interesse científico pela cinza vulcânica como material cimentício suplementar tem crescido de forma contínua desde 2015, com uma produção concentrada principalmente nas áreas de Engenharia e Ciência dos Materiais. Essa orientação confirma que a literatura tem priorizado a avaliação do desempenho mecânico, da durabilidade e da caracterização físico-química das misturas cimentícias com materiais vulcânicos, conforme apresentado nas Figuras 5, 6 e 11.

A distribuição geográfica revela uma concentração significativa da produção científica em países como Irã, Arábia Saudita e Turquia, acompanhada por redes de colaboração consolidadas na Ásia, no Oriente Médio e na Europa, conforme apresentado nas Figuras 9 e 10. Em contraste, a participação equatoriana continua sendo limitada, apesar de o país estar localizado em uma região de atividade vulcânica recorrente e apresentar fontes potenciais de materiais vulcânicos com interesse cimentício (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017). Essa diferença entre a disponibilidade geológica potencial e o desenvolvimento científico constitui uma lacuna de pesquisa aplicada, embora, por si só, não permita afirmar que exista disponibilidade industrial comprovada do recurso.

A análise de palavras-chave confirma que a literatura se articula em torno da resistência mecânica, durabilidade, atividade pozolânica, composição química e microestrutura. Esses resultados fornecem o referencial para interpretar criticamente as faixas de substituição, os mecanismos físico-químicos e as limitações associadas à variabilidade das cinzas vulcânicas.

5.2 O equilíbrio ótimo no desempenho mecânico

A análise das propriedades mecânicas mostra que a cinza vulcânica pode melhorar a resistência à compressão e à flexão quando utilizada em faixas moderadas de substituição e apresenta reatividade suficiente. Em termos gerais, o intervalo de 10–20% oferece o melhor equilíbrio entre a resistência em idades iniciais e o desenvolvimento da resistência a longo prazo, conforme resumido na Tabela 1 (Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain & Lachemi, 2007; Kupwade-Patil, Chin, et al., 2018; Lo et al., 2009).

Nesse intervalo, as fases silicoaluminosas reativas da cinza consomem parte da portlandita gerada durante a hidratação do clínquer e favorecem a formação secundária de C-S-H e C-A-S-H, contribuindo para a densificação da matriz e o refinamento da rede porosa (Y. Cao et al., 2025; Jackson et al., 2017; Wei et al., 2005). Por outro lado, substituições superiores a 30% tendem a reduzir a resistência em idades iniciais devido ao efeito de diluição, à menor quantidade de clínquer hidratável e à possível presença de partículas de cinza não reagidas (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Zhou et al., 2021).

A formação de C-A-S-H é condicionada pela disponibilidade de silício e alumínio reativos, pela fração amorfa da cinza, pela presença de cálcio proveniente da portlandita, pelo ambiente alcalino, pela finura e pelas condições de cura. Consequentemente, a presença de cinza vulcânica, por si só, não garante a formação desses produtos; o mecanismo depende da interação entre a reatividade do material e as condições químicas da matriz cimentícia (Fernandes et al., 2025; Játiva et al., 2025; Kupwade-Patil, De Wolf, et al., 2018; Tomoyose et al., 2020).

Essa interpretação explica por que as substituições moderadas geralmente apresentam desempenho superior ao das substituições em teores elevados. Quando há quantidade suficiente de clínquer hidratável, a matriz dispõe de portlandita para sustentar a reação pozolânica; quando a substituição é excessiva, reduz-se a fonte de cálcio e aumenta-se a fração de cinza potencialmente não reagida. No entanto, esse limite pode ser ampliado por meio de moagem, ativação, cura prolongada ou sistemas cimentícios ternários, desde que sua eficácia técnica e ambiental seja comprovada (Ababneh et al., 2024; Bawab et al., 2024; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhou et al., 2021).

Para a resistência à flexão, as evidências situam a faixa mais favorável entre 10% e 15%, conforme apresentado na Tabela 3. Esse comportamento está relacionado ao refinamento da matriz e da zona de transição interfacial, o que melhora a aderência agregado–pasta e a resposta frente aos esforços de tração na flexão (Bawab et al., 2024; Khan et al., 2022; Peng et al., 2024). No entanto, incrementos adicionais podem reduzir a trabalhabilidade e retardar a pega, especialmente quando a finura do material aumenta a demanda de água ou quando predomina o efeito de diluição (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; K. M. A. Hossain, 2003).

Em conjunto, a finura, a composição química, a fração amorfa, os processos de ativação e o regime de cura determinam se uma substituição em teor elevado pode manter um desempenho mecânico aceitável. Portanto, o percentual de cinza vulcânica não deve ser utilizado como único critério de dosagem (M. Cao & Zhang, 2023; Hazarika et al., 2025; Kupwade-Patil, Tyagi, et al., 2016; Masmoudi et al., 2017).

5.3 Durabilidade: benefícios e limites de desempenho.

As evidências científicas confirmam que a cinza vulcânica (CV) melhora significativamente a durabilidade do concreto, especialmente frente ao ataque por sulfatos e à penetração de cloretos. As faixas de substituição de 10–20% mostram-se ótimas para equilibrar o desempenho mecânico e a durabilidade, embora teores de até 40% possam ser avaliados quando se prioriza a resistência química a longo prazo, ainda que seu comportamento dependa da reatividade e da dosagem da mistura, conforme sintetizado na Tabela 4. Esse comportamento é explicado pela reação pozolânica da CV, que consome a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), refina a estrutura dos poros e limita a formação de etringita expansiva em ambientes com presença de sulfatos (Bawab et al., 2025b; Canpolat et al., 2007; Das Gupta et al., 2025).

Da mesma forma, na faixa de 10–20%, são relatadas reduções de até 80–90% na permeabilidade e na difusão de cloretos, atribuídas à densificação da matriz e à formação de sal de Friedel, que imobiliza quimicamente os cloretos (Anwar Hossain, 2006; Edris et al., 2021; Ibrahim et al., 2025). No entanto, substituições superiores a 40% podem aumentar a profundidade de carbonatação e reduzir a resistência mecânica devido à diminuição da reserva alcalina do concreto (Flores Medina

et al., 2015; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Lammertijn & De Belie, 2008). Portanto, o teor de CV deve ser definido como um parâmetro crítico de dosagem, particularmente relevante para contextos com elevada disponibilidade de recursos vulcânicos, como o Equador.

5.4 Oportunidades e condições para a valorização da cinza vulcânica no Equador.

O Equador apresenta condições geológicas favoráveis para a investigação de cinzas vulcânicas e pozolanas naturais como potenciais materiais cimentícios suplementares, devido à sua localização em uma região de atividade vulcânica recorrente. No entanto, essa condição não equivale automaticamente à disponibilidade industrial, uma vez que o aproveitamento depende da acessibilidade, continuidade, volume, composição química, mineralogia e reatividade de cada fonte (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

A principal oportunidade para o Equador consiste em desenvolver uma base técnica que permita diferenciar entre cinzas com potencial pozolânico, materiais que requerem tratamento prévio e fontes que não apresentam reatividade suficiente. Essa necessidade é justificada pela variabilidade dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , fase amorfa, mineralogia, finura e superfície específica relatada para materiais vulcânicos de diferentes procedências (Gil-Martín et al., 2025; Shahjalal et al., 2025; Sokołowska, 2025). Consequentemente, as faixas de substituição obtidas com cinzas de outras regiões não devem ser extrapoladas diretamente para materiais equatorianos.

Os processos de tratamento devem ser definidos de acordo com as características iniciais do material. A secagem pode ser necessária para controlar a dosagem; a moagem e a classificação granulométrica podem aumentar a superfície específica e melhorar o efeito filer; e a ativação mecânica, térmica ou química pode ser avaliada quando a reatividade for insuficiente. No entanto, essas alternativas podem aumentar a demanda energética, os custos e as emissões associadas, razão pela qual devem ser justificadas por meio de um balanço técnico, econômico e ambiental (Ababneh et al., 2024; Khan & Amin, 2017; Martín-Rodríguez et al., 2024; Zhang et al., 2025).

A logística também condiciona a viabilidade industrial. A distância entre as fontes, as fábricas de cimento, as centrais de concreto e as obras pode modificar os benefícios ambientais e econômicos obtidos por meio da redução do clínquer.

Portanto, um material com desempenho favorável em laboratório pode não ser viável se exigir transporte por longas distâncias, processamento com elevado consumo energético ou não apresentar regularidade na qualidade e no fornecimento (Cavaliere et al., 2024; Mohamad et al., 2020).

No âmbito normativo, a incorporação de cinza vulcânica requer critérios de aceitação relacionados à composição química, finura, perda ao fogo, atividade pozolânica, resistência relativa e durabilidade, os quais deverão ser adaptados às características dos cimentos, agregados e condições de exposição locais.

Consequentemente, as oportunidades para o Equador devem ser compreendidas como uma agenda de pesquisa, normalização e transferência de tecnologia. A Tabela 6 apresenta as principais condições para a valorização da cinza vulcânica como material cimentício suplementar (SCM), incluindo a disponibilidade real do recurso, caracterização, tratamento, desempenho, logística, impacto ambiental e controle normativo.

Tabela 6. Condições para a valorização da cinza vulcânica como material cimentício suplementar no Equador.

Dimensão	Aspecto crítico	Informações necessárias	Implicação para o Equador
Disponibilidade do recurso	Presença de depósitos ou emissões aproveitáveis	Inventário geológico, volume, acessibilidade e continuidade	A disponibilidade industrial não deve ser presumida sem dados
Caracterização química	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, álcalis, SO ₃	XRF, LOI, controle químico	Define se o material pode atuar como pozolana
Caracterização mineralógica	Fase amorfa, fases cristalinas, vidro vulcânico	XRD, quantificação da fase amorfa	Controla a reatividade pozolânica
Propriedades físicas	Finura, tamanho das partículas, superfície específica	Granulometria, Blaine/BET	Influencia a reatividade, a demanda de água e a trabalhabilidade
Benefício do material	Secagem, moagem, classificação	Protocolo de processamento	Melhora a uniformidade e o desempenho
Desempenho mecânico	Compressão, flexão, resistência relativa	Ensaio em argamassa e concreto	Define faixas de substituição viáveis
Durabilidade	Sulfatos, cloretos, permeabilidade, carbonatação	Ensaio de vida útil e exposição	Determina a segurança para a infraestrutura
Logística	Distância até fábricas de cimento/centrais de concreto, transporte, umidade	Análises técnico-econômico	Pode definir a viabilidade real
Normas nacionais e internacionais	Critérios de aceitação de pozolanas naturais e SCM	Comparação com requisitos internacionais e adaptação aos cimentos/agregados locais	Necessária para a adoção industrial e o controle de qualidade
Tratamento do material	Secagem, moagem, classificação e possível ativação	Energia necessária, custo, melhoria da reatividade e efeito ambiental	O tratamento deve melhorar o desempenho sem anular os benefícios ambientais
Impacto ambiental	Redução do clínquer versus energia de tratamento	ACV e análise econômica	Evita falsas melhorias ambientais

Fonte: elaboração própria a partir da análise crítica das evidências internacionais e das condições identificadas para o contexto equatoriano.

A Tabela 6 evidencia que a disponibilidade geológica constitui apenas a primeira condição para

uma possível aplicação industrial. A viabilidade real dependerá de que as fontes apresentem continuidade, acessibilidade e uniformidade composicional; além disso, os benefícios decorrentes da redução do clínquer deverão superar os impactos e os custos associados à secagem, moagem, classificação e transporte. Portanto, antes de uma incorporação normativa ou industrial, será necessário validar as cinzas equatorianas com cimentos e agregados locais, sob condições de exposição representativas do país.

Em síntese, as evidências revisadas indicam que as substituições entre 10% e 25% oferecem o equilíbrio mais consistente entre desempenho mecânico, durabilidade e refinamento microestrutural, embora essas faixas não constituam critérios universais. Sua eficácia depende da fração amorfa, da finura, da disponibilidade de portlandita, das condições de cura e da dosagem da mistura; enquanto substituições em teores elevados requerem ativação ou sistemas ternários para limitar o efeito de diluição e o risco de carbonatação (Bawab et al., 2024; Hasan et al., 2024; Kupwade-Patil, Al-Aibani, et al., 2016; Zhou et al., 2021). Para o Equador, a transferência desses resultados exige caracterização local, avaliação logística, validação ambiental e critérios normativos antes de uma incorporação industrial (Pinos-Velez et al., 2024; Toulkeridis & Zach, 2017).

6. CONCLUSÕES

A revisão sistematizada e a análise bibliométrica complementar permitiram avaliar o desempenho mecânico, a durabilidade, os mecanismos pozolânicos e as condições de aplicação da cinza vulcânica como material cimentício suplementar. Com base nas evidências analisadas, estabelecem-se as seguintes conclusões:

- 1 Os teores de cinza vulcânica entre 10% e 25% apresentam, em termos gerais, o equilíbrio mais favorável entre resistência mecânica, durabilidade e refinamento microestrutural. No entanto, esse intervalo é orientativo e não constitui um critério universal de dosagem, devido à variabilidade da composição química, mineralogia, fração amorfa, finura, tipo de cimento, relação água/material cimentício e condições de cura.
- 2 O desempenho favorável da cinza vulcânica está relacionado à sua atividade pozolânica e ao efeito físico de suas partículas. A reação das fases silicoaluminosas com a portlandita pode promover a formação secundária de C-S-H e C-A-S-H, reduzir a conectividade capilar e densificar a matriz. Em substituições elevadas, a menor disponibilidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o efeito de diluição podem limitar a reação, reduzir a resistência em idades iniciais e deixar uma fração do material sem reagir.
- 3 As substituições moderadas podem melhorar a resistência à penetração de água, cloretos e sulfatos; no entanto, substituições elevadas podem reduzir a reserva alcalina e aumentar a suscetibilidade à carbonatação. Portanto, a contribuição da cinza vulcânica para a redução do fator clínquer deve ser avaliada conjuntamente com a resistência mecânica, a durabilidade e a vida útil, e não apenas com base no percentual de cimento substituído.
- 4 Para o Equador, a cinza vulcânica representa uma alternativa potencial, porém ainda condicionada à validação local. Sua aplicação requer a identificação e caracterização das fontes disponíveis, a avaliação da variabilidade do material, a definição dos tratamentos necessários, a verificação de seu comportamento com cimentos e agregados locais e a análise da logística, dos custos, do impacto ambiental e dos critérios normativos. Consequentemente, sua incorporação industrial requer validação técnica, normativa, logística e ambiental antes do estabelecimento de faixas de substituição aplicáveis ao país.

Em outras palavras, a valorização da cinza vulcânica no Equador não deve se limitar à extrapolação direta das faixas ótimas internacionais, mas exige o estabelecimento de uma agenda nacional de

pesquisa aplicada e transferência de tecnologia. Para avançar da identificação territorial do recurso para sua incorporação segura e viável na indústria da construção, é imprescindível realizar caracterizações detalhadas das fontes locais, avaliar processos de tratamento e moagem controlada e desenvolver estudos de durabilidade em condições reais de exposição. Por fim, o sucesso dessa alternativa sustentável depende da criação de marcos normativos e critérios específicos de controle de qualidade que garantam a compatibilidade logística, ambiental e econômica da cinza vulcânica como SCM no contexto equatoriano.

7. AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial à “Escola de Habitat, Infraestrutura e Criatividade” e à “Diretoria de Pesquisa” da “Pontifícia Universidade Católica do Equador, Sede Ambato”, pelo apoio à realização desta pesquisa.

8. REFERENCIAS

- A Lachemi, K. M. (2004). *Residual strength and durability of volcanic ash concrete exposed to high temperature*.
- Ababneh, A. N., Matalkah, F., & Al-Akhras, M. (2024). *The use of graphene nanoplatelets for enhancement of the compressive strength of mortar containing high-levels of natural Pozzolan*. Construction and Building Materials, 449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138302>
- Ali, M. K., Kareem, Q., Ahmad, S., Shawkat, I. A., & Kassim, M. M. (2023). *Compressive and Flexural Strength of High-Volume Fly Ash Mortars Aged with Air-entraining Admixtures*. E3S Web of Conferences, 427. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342702017>
- Al-jabali, H. M., Edris, W. F., Al-Tamimi, M., Al Sayed, A. A. K. A., & Selouma, T. I. (2025). *Evaluation of the degradation of mortar with volcanic tuff replacement via destructive and non-destructive testing*. Case Studies in Construction Materials, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04308>
- Al-Swaidani, A. M. (2017). *Production of more durable and sustainable concretes using volcanic scoria as cement replacement*. Materiales de Construcción, 67(326). <https://doi.org/10.3989/mc.2017.00716>
- al-Swaidani, A. M., Aliyan, S. D., & Adarnaly, N. (2016). *Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(2), 970–979. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.12.006>
- Altamari, F., Barbieri, L., Saccani, A., & Lancellotti, I. (2025). *Recycling Volcanic Lapillus as a Supplementary Cementitious Material in Sustainable Mortars*. Recycling, 10(4). <https://doi.org/10.3390/recycling10040153>
- Amine, Y., Leklou, N., & Amiri, O. (2017). *Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes*. Energy Procedia, 139, 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.254>
- Anwar Hossain, K. M. (n.d.). *Performance of Volcanic Ash Based Precast and In Situ Blended Cement Concretes in Marine Environment*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200517:6694>
- Anwar Hossain, K. M. (2006). *High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures*. Cement and Concrete Composites, 28(6), 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>
- Bashir, M. I., & Elahi, A. (2023). *Micro Structural Study of Concrete with Indigenous Volcanic Ash*. Engineering Proceedings, 44(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023044019>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2024). *Synergetic impact of volcanic ash and calcium carbide residue on the properties and microstructure of cementitious composites*.

- Construction and Building Materials, 439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137390>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2025a). *Recycling of volcanic ash and carbide slag in blended mortars: A multi-criteria performance assessment*. Environmental Challenges, 20. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101222>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & Khatib, J. (2025b, August). *Optimizing the Mix Design of Cementitious Composites Incorporating Volcanic Ash by Taguchi-TOPSIS Method*. Proceedings of the 11th World Congress on New Technologies. <https://doi.org/10.11159/icceia25.155>
- Begaye, M. L., Aboubakr, S. H., Kim, J. J., & Reda Taha, M. M. (n.d.). *NANO-CREEP OF SYNTHETIC CSH PRODUCED USING 1.5 AND 0.7 CAO/SIO 2 MIXTURE RATIOS*.
- Canpolat, F., Yurdusev, M. A., Targan, S., & Yilmaz, K. (2007). *Sulfate resistance of mortars with and without silica fume and natural pozzolan*. Sustainable Construction Materials and Technologies - International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 325–332.
- Cao, M., & Zhang, H. (2023). *Fractal characteristics of particle groups and mechanochemical effects of Yellow River sediment after mechanical grinding*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 12(10), 1322 – 1333. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2218841>
- Cao, Y., Chen, L., Xie, G., Zhang, L., & Fan, Z. (2025). *Simulation the Hydration Process and Products Evolution of Low-Heat Cement Blended with Fly Ash*. In G. Feng, B. Zhang, W. X.-Y., J. Zhao, & A. Almerich-Chulia (Eds.), *Sustainable Civil Infrastructures* (pp. 393–401). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87959-3_34
- Cascone, S., Fazio, M., & Saeli, M. (2025). *Building Sustainability with Volcanic Ash: A Green Roof System Innovation*. Lecture Notes in Civil Engineering, 611 LNCE, 134–149. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71863-2_9
- Cavaleri, M., Ferrara, P. L., Finocchiaro, C., & Martorana, M. F. (2024). *An Economic Analysis of the Use of Local Natural Waste: Volcanic Ash of Mt. Etna Volcano (Italy) for Geopolymer Production*. Sustainability (Switzerland), 16(2). <https://doi.org/10.3390/su16020740>
- Dahiru, D., Ibrahim, M., & Gado, A. A. (2019). *Evaluation of the Effect of Volcanic Ash on the Properties of Concrete 1 2 3*. In ATBU Journal of Environmental Technology (Vol. 12).
- Darwis, F., Banggu, I., & Sultan, M. A. (2018). *The Effects Of Volcanic Ash On The Strength And Permeability Mortar*. <https://doi.org/10.2991/icst-18.2018.78>
- Das Gupta, S., Zayed, A., Ferraro, C., & Riding, K. (2025). *Sulfate Durability of Type IL-Slag Blended Cement under Different Curing Exposures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 37(12). <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-20938>
- de Siqueira, A. A., & Cordeiro, G. C. (2022). *Sustainable Cements Containing Sugarcane Bagasse Ash and Limestone: Effects on Compressive Strength and Acid Attack of Mortar*. Sustainability (Switzerland), 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095683>
- Demirel, B., & Keleştemur, O. (2010). *Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume*. Fire Safety Journal, 45(6–8), 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.08.002>
- Díaz, J. E., Izquierdo, S. R., de Gutiérrez, R. M., & Gordillo S., M. (2013). *Ternary mixture of portland cement, blast furnace slag and limestone: Mechanical strength and durability; [Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad]*. Revista de la Construcción, 12(3), 53 – 60.
- Djon Li Ndjock, B. I., Elimbi, A., & Cyr, M. (2017). *Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation*. Journal of Non-Crystalline Solids, 463, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.02.024>
- Edris, W. F., Abdelkader, S., Salama, A. H. E., & Al Sayed, A. A. K. A. (2021). *Concrete behaviour with volcanic tuff inclusion*. Civil Engineering and Architecture, 9(5), 1434–1441.

<https://doi.org/10.13189/CEA.2021.090516>

- Elshinawy, A., Yousry Elshikh, M. M., Kaloop, M. R., El-Demerdash, W. E., & Elemam, W. E. (2025). *An experimental investigation on mechanical characteristics of steel-fiber-reinforced volcanic concrete*. Next Materials, 6. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100308>
- Fernandes, I. V, Gonçalves da Silva, A. G. A., Santos, M. D., Nascimento, C. F. G., Lima, V. M. E., Holanda, R. M., & Melo Neto, A. A. (2025). *Physicochemical and microstructural interactions between cement and textile sludge ash for application in dry concrete*. Journal of Building Engineering, 112, 113919. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113919>
- Fernández-Jiménez, A., Garcia-Lodeiro, I., Maltseva, O., & Palomo, A. (2023). *Sustainable Cements: Hybrid Alkaline Cements Overview*. In RILEM Bookseries (Vol. 40, pp. 626–639). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_68
- Flores Medina, N., Barluenga, G., & Hernández-Olivares, F. (2015). *Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement*. Construction and Building Materials, 96, 556–566. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050>
- Gao, R., Zhao, S., Li, Q., & Chen, J. (2010). *Experimental study of the deterioration mechanism of concrete under sulfate attack in wet-dry cycles*. Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal, 43(2), 48–54.
- Garces-Vargas, J. F., Díaz-Cardenas, Y., & Martirena Hernandez, J. F. (2024). *Evaluation of the Durability of Concrete with the Use of Calcined Clays and Limestone in Salinas, Ecuador*. Minerals, 14(5). <https://doi.org/10.3390/min14050460>
- Gil-Martín, L. M., Oliveira, M. J., Fernández-Ruiz, M. A., Branco, F. G., & Hernández-Montes, E. (2025). *Sustainable Use of Volcanic Ash in Mortars as a Replacement for Cement or Sand: Shrinkage and Physical and Mechanical Properties*. Materials, 18(15). <https://doi.org/10.3390/ma18153694>
- Hasan, M. S., Karmokar, J., & Mahmood, S. M. F. (2024). *Strength and Workability of Concrete Incorporating Volcanic Ash as a Partial Replacement for Cement*. Lecture Notes in Civil Engineering, 512 LNCE, 251–258. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63280-8_26
- Hazarika, A., Huang, L., Erlingsson, S., de Weerd, K., Löfgren, I., Iftikhar, S., & Babaahmadi, A. (2025). *Characterization, activation and reactivity – A case study of Nordic volcanic materials for application as Supplementary Cementitious Materials*. Case Studies in Construction Materials, 22. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04096>
- Ho, L. S., Ngo, H. T. T., Vu, H. T., Nguyen, S. T., Chau, V. N., & Dang, V. Q. (2023). *Durability of mortar and concrete containing pozzolans as a partial cement replacement in the marine environment: a review*. Journal of Science and Transport Technology, 3(3), 13 – 25. <https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.en.3.3.13-25>
- Hossain, A. (n.d.). *Lightweight structural concrete incorporating volcanic materials for sustainable construction*.
- Hossain, A., Khandaker, M. A., & Lachemi, M. (2006). *Development of volcanic ash concrete: Strength, durability, and microstructural investigations*. ACI Materials Journal.
- Hossain, K. M. A. (2003). *Blended cement using volcanic ash and pumice*. Cement and Concrete Research, 33(10), 1601–1605. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00127-3)
- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2004). *Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar*. Cement and Concrete Research, 34(4), 695–702. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.021>
- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2007). *Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete*. Cement and Concrete Research, 37(5), 759–766. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.014>
- Hossain, M. U., Dong, Y., & Ng, S. T. (2021). *Influence of supplementary cementitious materials*

- in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00659>
- Hu, Y. J., & Du, Y. L. (2013). *Effect of pore structure on the chloride permeability of concrete with mineral admixture*. *Advanced Materials Research*, 690–693, 835–838. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.835>
- Ibrahim, M., Bahraq, A. A., Salami, B. A., Alhems, L. M., Hussaini, S. R., Nasir, M., & Adewumi, A. A. (2025). *Pore Structure Characterization and Environmental Assessment of Ground Volcanic Pumice-Based Alkali-Activated Concrete*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00791-3>
- Jackson, M. D., Mulcahy, S. R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P., & Wenk, H. R. (2017). *Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete*. *American Mineralogist*, 102(7), 1435–1450. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5993CCBY>
- Játiva, A., Corominas, A., & Etxeberria, M. (2025). *Durable Mortar Mixes Using 50% of Activated Volcanic Ash as A Binder*. *Materials*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ma18081777>
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., & Saeting, T. (2007). *Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash*. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1399–1405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.005>
- Jubera-Pérez, F. J., Jaizme-Vega, E., Rosa-Orihuela, R., Damas-Montesdeoca, R., Hernández-Díaz, C., Rodríguez-Díaz, J., & González-Díaz, E. (2024). *Pozzolanic activity of volcanic ashes produced by the eruption of the Tajogaite Volcano in La Palma, Canary Islands*. *Construction and Building Materials*, 419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135498>
- Keshta, M. M., Elshikh, M. M. Y., Abd Elrahman, M., & Youssf, O. (2022). *Utilizing of Magnetized Water in Enhancing of Volcanic Concrete Characteristics*. *Journal of Composites Science*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/jcs6100320>
- Khan, K., & Amin, M. N. (2017). *Influence of fineness of volcanic ash and its blends with quarry dust and slag on compressive strength of mortar under different curing temperatures*. *Construction and Building Materials*, 154, 514–528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.214>
- Khan, K., Amin, M. N., Saleem, M. U., Qureshi, H. J., Al-Faiad, M. A., & Qadir, M. G. (2019). *Effect of fineness of basaltic volcanic ash on pozzolanic reactivity, ASR expansion and drying shrinkage of blended cement mortars*. *Materials*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/ma12162603>
- Khan, K., Amin, M. N., Usman, M., Imran, M., Al-Faiad, M. A., & Shalabi, F. I. (2022). *Effect of Fineness and Heat Treatment on the Pozzolanic Activity of Natural Volcanic Ash for Its Utilization as Supplementary Cementitious Materials*. *Crystals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/cryst12020302>
- Kiran Kumar, V., Seshadri Sekhar, T., & Srinivasa Rao, P. (2024). *EXPERIMENTAL STUDIES ON QUATERNARY BLENDED CONCRETE UNDER ACID RESISTANCE, SULPHATE RESISTANCE, WATER PERMEABILITY, AND CHLORIDE PERMEABILITY*. *Indian Concrete Journal*, 98(9), 51–58.
- Klausen, A. B. E., Menga, A., & Kanstad, T. (2025). *Compressive strength development of concretes with volcanic ash exposed to realistic temperature conditions*. In M. Briffaut & J. M. Torrenti (Eds.), *fib Symposium* (pp. 825–833). fib. The International Federation for Structural Concrete.
- Kupwade-Patil, K., Al-Aibani, A. F., Abdulsalam, M. F., Mao, C., Bumajdad, A., Palkovic, S. D., & Büyüköztürk, O. (2016). *Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing*. *Construction and Building Materials*, 113, 423–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.084>
- Kupwade-Patil, K., Chin, S., Ilavsky, J., Andrews, R. N., Bumajdad, A., & Büyüköztürk, O. (2018). *Hydration kinetics and morphology of cement pastes with pozzolanic volcanic ash studied via*

- synchrotron-based techniques*. Journal of Materials Science, 53(3), 1743–1757. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1659-4>
- Kupwade-Patil, K., De Wolf, C., Chin, S., Ochsendorf, J., Hajiah, A. E., Al-Mumin, A., & Büyüköztürk, O. (2018). *Impact of Embodied Energy on materials/buildings with partial replacement of ordinary Portland Cement (OPC) by natural Pozzolan volcanic Ash*. Journal of Cleaner Production, 177, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.234>
- Kupwade-Patil, K., Palkovic, S. D., Bumajdad, A., Soriano, C., & Büyüköztürk, O. (2018). *Use of silica fume and natural volcanic ash as a replacement to Portland cement: Micro and pore structural investigation using NMR, XRD, FTIR and X-ray microtomography*. Construction and Building Materials, 158, 574–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.165>
- Kupwade-Patil, K., Tyagi, M., Brown, C. M., & Büyüköztürk, O. (2016). *Water dynamics in cement paste at early age prepared with pozzolan volcanic ash and Ordinary Portland Cement using quasielastic neutron scattering*. Cement and Concrete Research, 86, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.011>
- Lammertijn, S., & De Belie, N. (2008). *Porosity, gas permeability, carbonation and their interaction in high-volume fly ash concrete*. Magazine of Concrete Research, 60(7), 535–545. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.60.7.535>
- Letelier, V., Ortega, J. M., Tarela, E., Muñoz, P., Henríquez-Jara, B. I., & Moriconi, G. (2018). *Mechanical performance of eco-friendly concretes with volcanic powder and recycled concrete aggregates*. Sustainability (Switzerland), 10(9). <https://doi.org/10.3390/su10093036>
- Liu, J. C., Hossain, M. U., Xuan, D., Ali, H. A., Ng, S. T., & Ye, H. (2023). *Mechanical and durability performance of sustainable concretes containing conventional and emerging supplementary cementitious materials*. Developments in the Built Environment, 15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100197>
- Liu, J., Wu, K., Wang, Y., & Yang, Y. (2017). *Effects of fly ash/diatomite admixture with variable particle sizes on the mechanical properties and porosity of concrete*. Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 32(5), 1072–1079. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1713-8>
- Lo, T. Y., Nadeem, A., Tang, W. C. P., & Yu, P. C. (2009). *The effect of high temperature curing on the strength and carbonation of pozzolan structural lightweight concretes*. Construction and Building Materials, 23(3), 1306–1310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.026>
- Martín-Rodríguez, P., Fernández-Jiménez, A., Alonso, M. del M., Palomo, A., & García-Lodeiro, I. (2024). *Valorisation of “La Palma” Volcanic Ash for Making Portland-Blended, Alkaline and Hybrid Portland-Alkaline Cements*. Materials, 17(1). <https://doi.org/10.3390/ma17010242>
- Masmoudi, R., Kupwade-Patil, K., Bumajdad, A., & Büyüköztürk, O. (2017). *In situ Raman studies on cement paste prepared with natural pozzolan volcanic ash and Ordinary Portland Cement*. Construction and Building Materials, 148, 444–454. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.016>
- Mitrović, A. A. (2011). *Pozzolan obtained by mechanochemical treatment of kaolin clay*. AIP Conference Proceedings, 1400, 82–86. <https://doi.org/10.1063/1.3663090>
- Mohamad, S. A., Al-Hamd, R. K. S., & Khaled, T. T. (2020). *Investigating the effect of elevated temperatures on the properties of mortar produced with volcanic ash*. Innovative Infrastructure Solutions, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0274-4>
- Nair, N. A., & Viswanathan, T. S. (2023). *β -CaSiO₃ and colloidal n-SiO₂ based blended cement composites- their properties, regression analysis and micro-characterization studies*. Materiales de Construcción, 73(350). <https://doi.org/10.3989/mc.2023.304722>
- Nováková, I., Jhatial, A. A., Kekez, S., Gjerløw, E., Gulik, V., Kannathasan, K. R., Vaišnoras, M., & Krasnikovs, A. (2024). *Investigating the Influence of Oil Shale Ash and Basalt Composite Fibres on the Interfacial Transition Zone in Concrete*. Buildings, 14(7).

<https://doi.org/10.3390/buildings14071952>

Ogunbode, E. B., & Hassan, I. O. (2011). *Effect of addition of calcium nitrate on selected properties of concrete containing volcanic ash*. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 10(19), 29–38.

Omikrine Metalssi, O., Quiertant, M., Jabbour, M., & Baroghel-Bouny, V. (2024). *Effect of Exposure Conditions on Mortar Subjected to an External Sulfate Attack*. Materials, 17(13).

<https://doi.org/10.3390/ma17133198>

Özen, S., & Uzal, B. (2021). *Effect of mineralogical composition of clinoptilolite-bearing tuffs on their performance as a natural pozzolan in cementitious systems*. Advances in Concrete Construction, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.1.025>

Peng, G., Zhang, G., Zuo, X., Ding, H., Chen, X., Wang, H., & Liu, X. (2024). *Mechanism for the Influence of Added Hydrated Lime on Mechanical Properties of Ultra-high Strength Concrete*. Cailiao Daobao/Materials Reports, 38(3). <https://doi.org/10.11896/cldb.22060068>

Petroche, D. M., & Ramirez, A. D. (2022). *The Environmental Profile of Clinker, Cement, and Concrete: A Life Cycle Perspective Study Based on Ecuadorian Data*. Buildings, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030311>

Pinos-Velez, V. P., Araujo, G. S., Echeverria-Paredes, P., Abril, M., Acosta, S., Cipriani-Ávila, I., Moulatlet, G. M., & Capparelli, M. V. (2024). *Acute and Chronic Ecotoxicity of Daphnia magna Exposed to Ash Leachate from the Cotopaxi Volcano, Ecuador*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 113(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-024-03946-2>

Pinto-Almeida, C., Abril-Camino, A., & Abril-Camino, D. (2025). *Mechanical Performance of Volcanic Ash Concrete Showing Modulus Reduction with Strength Retention*. Civil Engineering Journal, 11(10), 4422–4435. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-10-024>

Rajesh, A., Gowdhaman, D., & Sumathi, A. (2023). *Utilization of industrial and agricultural waste as supplementary cementitious addition in bacteria concrete—a review*. In Valorization of Wastes for Sustainable Development: Waste to Wealth. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95417-4.00016-0>

Rajesh, J., & Kandasamy, S. (2025). *Particle size reduction effects on fly ash pozzolanic performance in cement*. Construction and Building Materials, 494, 143458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143458>

Rodrigues, A. L. M. V., Mendes, Á. Á. F., Gomes, V., Battagin, A. F., Saade, M. R. M., & Da Silva, M. G. (2022). *Environmental and Mechanical Evaluation of Blended Cements With High Mineral Admixture Content*. Frontiers in Materials, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.880986>

Rols, S., Ambroise, J., Péra, J., & Chabannet, M. (2000). *Calcined paper sludge-pozzolan admixture to improve sulfate resistance of concrete*. In V. M. Malhotra (Ed.), American Concrete Institute, ACI Special Publication: SP-192 (pp. 353–367). American Concrete Institute.

Rovnaník, P., Teplý, B., & Rovnaníková, P. (2007). *Concrete mix and environmental load in the context of durability and reliability*. CESB 2007 PRAGUE International Conference - Central Europe Towards Sustainable Building, 2.

Shahjalal, M., Sabrin, R., Bachu, H. A. E., Habib, M. M. L., Mobasharah, N., & Billah, A. H. M. M. (2025). *Repurposing waste pozzolans for cleaner mortar production: mechanical and durability properties with microstructural behavior*. Canadian Journal of Civil Engineering, 52(9), 1698–1717. <https://doi.org/10.1139/cjce-2025-0014>

Sharfuddin Ahmed, M., Kayali, O., & Anderson, W. (n.d.). *Evaluation of Binary and Ternary Blends of Pozzolan Materials Using the Rapid Chloride Permeability Test*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200921:9446>

Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). *Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review*. Cement and Concrete Research, 149.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>

Siddique, R. (2012). *Properties of concrete made with volcanic ash*.

Sideris, K. K., & Savva, A. E. (2001). *Resistance of Fly Ash and Natural Pozzolans Blended Cement Mortars and concrete to carbonation, sulfate attack and chloride ion penetration*. American Concrete Institute, ACI Special Publication, SP-199, 275–293. <https://doi.org/10.14359/10499>

Singh, L. P., Zhu, W., Howind, T., & Sharma, U. (2017). *Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system*. Cement and Concrete Composites, 79, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.004>

Singh, N., Sharma, R. L., & Yadav, K. (2023). *Sustainable development by carbon emission reduction and its quantification: an overview of current methods and best practices*. In Asian Journal of Civil Engineering (Vol. 24, Number 8, pp. 3797–3822). Institute for Ionics. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00732-z>

Singh, S., Sahu, I., Majmundar, B. P., David, R., Singh, J., Vanitha, S., & Thakur, G. (2026). *Multi-Scale evaluation and predictive modeling of volcanic Ash–Silica fume aggregate concrete for sustainable construction*. Architecture, Structures and Construction, 6(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44150-026-00187-1>

Sokołowska, J. J. (2025). *Utilizing Sakurajima Volcanic Ash as a Sustainable Partial Replacement for Portland Cement in Cementitious Mortars*. Sustainability (Switzerland), 17(17). <https://doi.org/10.3390/su17177576>

Souza, M. T., Onghero, L., Sakata, R. D., Neto, F. C., de Campos, C. E. M., de Castro Pessôa, J. R., Repette, W. L., & de Oliveira, A. P. N. (2023). *Insights into the acting mechanism of ettringite in expansive Portland cement*. Materials Letters, 345. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134496>

Suraneni, P., Hajibabaei, A., Ramanathan, S., Wang, Y., & Weiss, J. (2019). *New insights from reactivity testing of supplementary cementitious materials*. Cement and Concrete Composites, 103, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.017>

Tomoyose, A., Noguchi, T., Sodeyama, K., & Higashi, K. (2020). *Concrete with high-purity volcanic glass fine powder manufactured from pyroclastic deposit*. SN Applied Sciences, 2(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2614-6>

Toulkeridis, T., & Zach, I. (2017). *Wind directions of volcanic ash-charged clouds in Ecuador—implications for the public and flight safety*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8(2), 242–256. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1199445>

Uzbaş, B., & Aydın, A. C. (2019). *Analysis of Fly Ash Concrete With Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction*. Advances in Science and Technology Research Journal, 13(4), 100–110. <https://doi.org/10.12913/22998624/114178>

Vedalakshmi, R., Raj, A. S., Srinivasan, S., & Babu, K. G. (2003). *Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique*. Thermochimica Acta, 407(1–2), 49–60. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00286-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00286-7)

Wahyuni, Abdullah, Mulyati, S., & Hayati, Y. (2025). *Performance analysis of ordinary portland cement and portland pozzolan cement in improving sea sand and sea water concrete with zeolite powder*. Journal of Ecological Engineering, 26(4), 264–274. <https://doi.org/10.12911/22998993/200278>

Wang, Y., Hu, Y., He, X., Su, Y., Strnadel, B., & Miao, W. (2023). *Hydration and compressive strength of supersulfated cement with low-activity high alumina ferronickel slag*. Cement and Concrete Composites, 136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104892>

Wang, Y., Liu, H., Nie, Z., Xue, R., Zhu, W., & Sun, X. (2025). *Experimental investigation into the influence of calcium aluminate cement on the micro- and macro-mechanical properties of the interfacial transition zone in geopolymer concrete*. Developments in the Built Environment, 21.

<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100618>

Wei, F., Lu, Y., Lan, X., & Xu, Z. (2005). *Hydration products of fly ash cement-based material*. Kuei Suan Jen Hsueh Pao/ Journal of the Chinese Ceramic Society, 33(1), 52-56+62.

Xiong, C., Zhou, Y., Jin, Y., Liu, C., & Feng, P. (2022). *Fabrication, structure, and mechanical properties of a high-order calcium silicate hydrate based on polymer and pH tuning*. Materials Today Communications, 33. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105020>

Yu, L., Zhou, S., & Deng, W. (2015). *Pozzolanic activity of volcanic rocks from Southern Jiangxi Province, China*. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 5(3), 176–198. <https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1010660>

Zeyad, A. M., Shubaili, M., & Abutaleb, A. (2023). *Using volcanic pumice dust to produce high-strength self-curing concrete in hot weather regions*. Case Studies in Construction Materials, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01927>

Zhang, J., Yang, Y., Li, X., & Chi, C. (2025). *Alkali activation of industrial waste fly ash to produce high-value-added C-S-H seeds*. Advances in Cement Research. <https://doi.org/10.1680/jadcr.24.00141>

Zhao, J., Li, D., Liao, S., Wang, D., Wang, H., & Yan, P. (2018). *Influence of mechanical grinding on pozzolanic characteristics of circulating fluidized bed fly ash (CFA) and resulting consequences on hydration and hardening properties of blended cement*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 132(3), 1459–1470. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7103-4>

Zhou, Z., Sofi, M., Sabri, Y., Liu, J., Kang, S., & Mendis, P. (2021). *Microstructural Investigation of High-Volume Fly Ash Composites Containing Nano-Calcium Silicate Hydrate Crystals*. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003974](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003974)

Zhuginissov, M. T., Kuldeyev, E. I., Nurlybayev, R. E., Khamza, Y. Y., Orynbekov, Y. S., & Iskakov, A. (2026). *Use of fly ash and ground tuff as pozzolanic additives in lightweight structural*. Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra, 339(4), 38–51. <https://doi.org/10.31643/2026/6445.39>

Zunino, F., & Scrivener, K. (2025). *Hydration and strength development of low-clinker (<50 %) factor limestone calcined clay cements (LC3): A comparative study with natural pozzolans*. Construction and Building Materials, 499, 144075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144075>

Zunino, F., & Scrivener, K. L. (2024). *The Key Role of Limestone Calcined Clay Cements on the Roadmap towards Eco-Efficient Cement and Concrete*.