

ANÁLISE DA REATIVIDADE DE MCS NÃO CONVENCIONAIS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.VII-004>

Melissa Pastorini Proença (*), Gabrieli Totti, Flávia Netto, Miguel Batista de Oliveira, Nayara Soares Klein

* Instituto Federal do Paraná e Universidade Federal do Paraná, melissa.proenca@ifpr.edu.br.

RESUMO

Este estudo avalia a reatividade de materiais cimentícios suplementares (MCS) não convencionais para reduzir o consumo de cimento e, consequentemente, as emissões de carbono associadas à indústria cimenteira. Foram analisados resíduos de construção e demolição, vidro moído e cinzas de cavaco de eucalipto, comparando-os com MCS convencionais, como sílica ativa e metacaulim. A caracterização dos materiais incluiu análises de difração de raio-X, granulometria a laser e massa específica, foram realizados testes de reatividade, como atividade com cal aos 7 dias, consumo de hidróxido de cálcio e índice de desempenho com cimento aos 28 dias. Os resultados indicaram que apenas o pó cerâmico apresentou comportamento pozolânico, enquanto os demais materiais podem atuar na matriz cimentícia por efeito de enchimento. O pó de vidro, apesar de sua natureza amorfa, teve sua reatividade prejudicada pela granulometria. Com exceção da cinza de cavaco de eucalipto, todos os materiais analisados atingiram 75% de desempenho, podendo ser incorporados na produção de cimento, ou de misturas cimentícias. Assim, a pesquisa reforça a possibilidade de valorização de resíduos industriais e da construção civil, promovendo práticas mais sustentáveis no setor.

PALAVRAS-CHAVE: Cimento Ecoeficiente, Baixo Carbono, Resíduo de Construção, Fíler, Pó de Concreto.

ABSTRACT

This study evaluates the reactivity of unconventional supplementary cementitious materials (SCM) to reduce cement consumption and, consequently, the carbon emissions associated with the cement industry. Construction and demolition waste, ground glass, and eucalyptus chip ash were analyzed and compared with conventional SCM, such as silica fume and metakaolin. The characterization of the materials included X-ray diffraction analysis, laser granulometry, and specific mass determination. Reactivity tests were conducted, including lime activity at 7 days, calcium hydroxide consumption, and performance index with cement at 28 days. The results indicated that only ceramic powder exhibited pozzolanic behavior, while the other materials contributed to the cementitious matrix through a filler effect. Despite its amorphous nature, the reactivity of glass powder was hindered by its granulometry. Except for eucalyptus chip ash, all analyzed materials achieved 75% performance and can be incorporated into cement production or cementitious mixtures. Thus, the research reinforces the potential for valorizing industrial and construction waste, promoting more sustainable practices in the sector.

KEY WORDS: Eco-efficient cement, Low-carbon, Construction waste, Filler, Concrete powder.

INTRODUÇÃO

O setor construtivo contribui com uma significativa parcela da emissão de gases intensificadores do efeito estufa, com destaque na produção de cimento, que representa cerca de 7% das emissões totais de CO₂ produzidas globalmente. Na indústria cimenteira, 60% dessas emissões são provenientes da calcinação do calcário para a produção do principal componente do cimento Portland, o clínquer (SNIC; ABCP, 2019). Estima-se que a clínquerização gere uma emissão entre 0,84 e 1,05 kg de dióxido de carbono por quilograma de clínquer (SIDAC, 2024).

Nesse contexto, reduzir o teor de clínquer é primordial para obtenção de cimentos menos emissivos, isto pode ser realizado através da utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS), que são resíduos e subprodutos de diferentes indústrias, e quando finamente cominuídos podem compor o cimento, diminuindo o teor de clínquer (HOPPE FILHO et al., 2021). Materiais de diversas origens podem atuar como MCS, sob os efeitos de atividade pozolânica, atividade hidráulica e o efeito fíler (SNELLINGS, SURANENI, SKIBSTED, 2023; BERODIER; SCRIVENER, 2014).

A escória de alto forno e a cinza volante são materiais explorados na indústria cimenteira nacional atuando como MCS na composição do cimento, sendo resíduos oriundos de outras cadeias produtivas. Também o metacaulim e a sílica ativa são materiais convencionais incorporados às matrizes cimentícias (ADEDIRAN; VAN TRUONG; PERUMAL, 2025). Entretanto, a disponibilidade desses materiais é limitada, surgindo a necessidade de identificar novos MCS. Neste cenário, podem ser exploradas partículas de diversas origens, como cinzas residuais, resíduos de construção civil, entre outros.

A busca por alternativas sustentáveis tem impulsionado pesquisas voltadas à incorporação de resíduos em materiais cimentícios, reduzindo não apenas as emissões de CO₂, mas também mitigando impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado desses resíduos. Além disso, a adoção de MCS pode melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos materiais cimentícios, tornando-se uma solução viável para a indústria da construção civil.

Dentre os materiais emergentes, resíduos industriais e agroindustriais têm se destacado como alternativas promissoras. Estudos recentes apontam que cinzas de biomassa, resíduos vítreos e até mesmo materiais oriundos da reciclagem de concreto podem exibir características pozolânicas ou hidráulicas, tornando-os aptos para substituir parcialmente o clínquer (SNELLINGS, SURANENI, SKIBSTED, 2023). No entanto, a variabilidade na composição química e nas propriedades físicas desses materiais exige uma caracterização detalhada para garantir sua eficácia e viabilidade técnica. Empregar materiais cimentícios suplementares na composição do cimento, ou na matriz cimentícia reduzindo o consumo de cimento, é a principal estratégia para reduzir emissões de carbono associadas à indústria cimenteira. Levando em consideração esses aspectos, este estudo objetiva caracterizar e avaliar quanto à reatividade: pós oriundos de resíduos de construção e demolição, resíduo de vidro e cinzas de cavaco de eucalipto. Como parâmetros, também foram avaliados os MCS convencionais: metacaulim e a sílica ativa, buscando-se analisar o potencial dos materiais atuarem como MCS nas matrizes cimentícias.

OBJETIVO

Objetiva-se caracterizar e avaliar quanto a reatividade: pós de resíduos de construção e demolição, resíduo de vidro, e cinzas de cavaco de eucalipto, utilizando-se como parâmetros os materiais cimentícios suplementares (MCS) convencionais: metacaulim e a sílica ativa, buscando-se verificar o potencial de atuação como MCS nas matrizes cimentícias.

MATERIAIS

A sílica ativa e o metacaulim utilizados no estudo foram adquiridos no comércio. Os pós cerâmico, misto e de concreto, foram obtidos através do processamento dos resíduos de construção e demolição (RCD), respectivamente resíduos de tijolos cerâmicos, corpos de prova de concreto e uma areia de RCD, o pó de vidro foi gerado a partir de garrafas residuais de vidro soda-cal, estes materiais foram cominuídos em máquina de abrasão de Los Angeles, adotando-se o período de 2 horas para moagem, em função da maior formação de pó. Após moagem, foram separados por peneiramento, sendo a fração selecionada de $\phi < 0,15$ mm.

A cinza de cavaco de eucalipto coletada a partir do descarte do material em um frigorífico na região oeste do Paraná. A Figura 1 esquematiza a obtenção dos MCS, sendo denominados neste estudo conforme: sílica ativa (SA), metacaulim (MK), pó de concreto (PC), pó misto (PM), pó cerâmico (PT), pó de vidro (PV), e a cinza de cavaco de eucalipto (CCE).



Figura 1: Origem dos materiais utilizados. Fonte: Autores, 2025.

MÉTODOS

A caracterização físico-química dos MCS utilizados neste estudo foi realizada por difração de raio-X, massa específica e granulometria. A massa específica foi determinada por picnometria, conforme NBR ISO 12154:2020, utilizando o picnômetro a gás Anton Paar, modelo Ultrapyc 5000, com gás N₂ ultrapuro. A granulometria por difração a laser foi desenvolvida no granulômetro CILAS modelo 1190, utilizando isopropanol como meio dispersante. Para determinar a composição mineralógica foi aplicada difração de raio-X, no difratômetro Panalytical, com radiação Cu K α e $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ no modo spm, e os difratogramas foram analisados usando o software X'Pert High Score Plus V4.8 da Panalytical e comparados com padrões do banco de dados COD (Crystallography Open Database).

Os MCS passaram por determinação dos parâmetros físicos para materiais pozolânicos conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014). A atividade pozolânica foi verificada por métodos indiretos de: índice de desempenho com cimento aos 28 dias conforme NBR 5752: 2014¹, e atividade pozolânica com cal aos 7 dias NBR 5751: 2015². Para a análise de Reatividade do MCS foi determinado o consumo de hidróxido de cálcio através do método Chapelle modificado NBR 15895:2010³.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A massa específica (Figura 2) não apresentou grandes variações entre os materiais em análise, ficando entre 2,35 e 2,86 g/cm³. Quanto a granulometria das partículas, nota-se que os materiais se concentram na faixa de D50 entre 10 e 35 μm , sendo que os materiais investigados são superiores as partículas dos MCS convencionais SA e MK. Especialmente para PV, observamos partículas mais grossas, este fato pode prejudicar sua reatividade, visto (nas análises seguintes) que é um material amorfo de origem silicosa, e não atingiu aos parâmetros para ser caracterizado como pozolânico conforme NBR 12653 (ABNT, 2014).

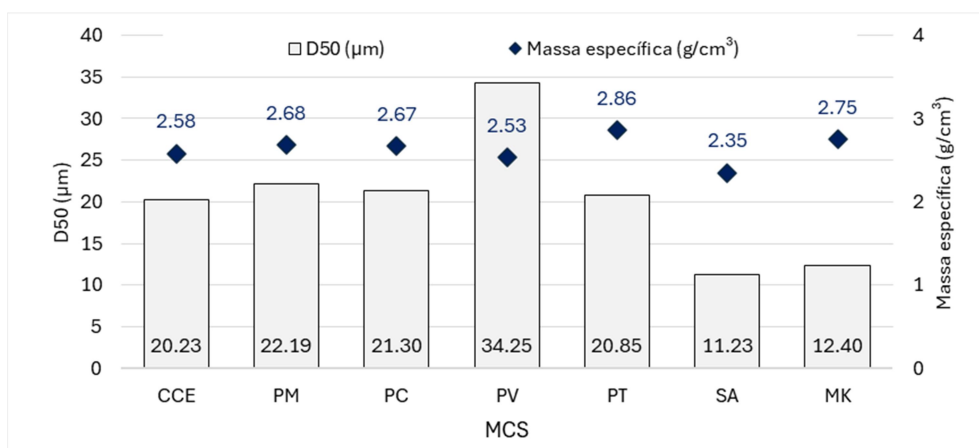


Figura 2: Massa específica e D50. Fonte: Autores, 2025.

Na análise da composição mineralógica por difração de raios-X (Figura 3), não foram identificados picos cristalinos no difratograma para o pó de vidro (PV), e para a sílica ativa (SA), esta condição indica materiais amorfos (HIGUCHI et al., 2021). No pó cerâmico predominam picos de sílica, também conforme verificado por Brekailo et al., (2019) e Hoppe Filho et al. (2021), já o pó de concreto apresentou picos de carbonato, sílica, portlandita e calcita; estes minerais são oriundos da composição de concreto e argamassa (WU et al., 2021), e no pó misto, há predominância de picos de sílica, carbonato de cálcio e labradorita (feldspato). O pico principal da CCE, que é um resíduo da queima do cavaco de eucalipto é o carbono na forma de grafite e, em menor extensão, portlandita e calcita, no metacaulim apenas os picos cristalinos de sílica foram identificados.

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal

³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle. Rio de Janeiro, 2010.

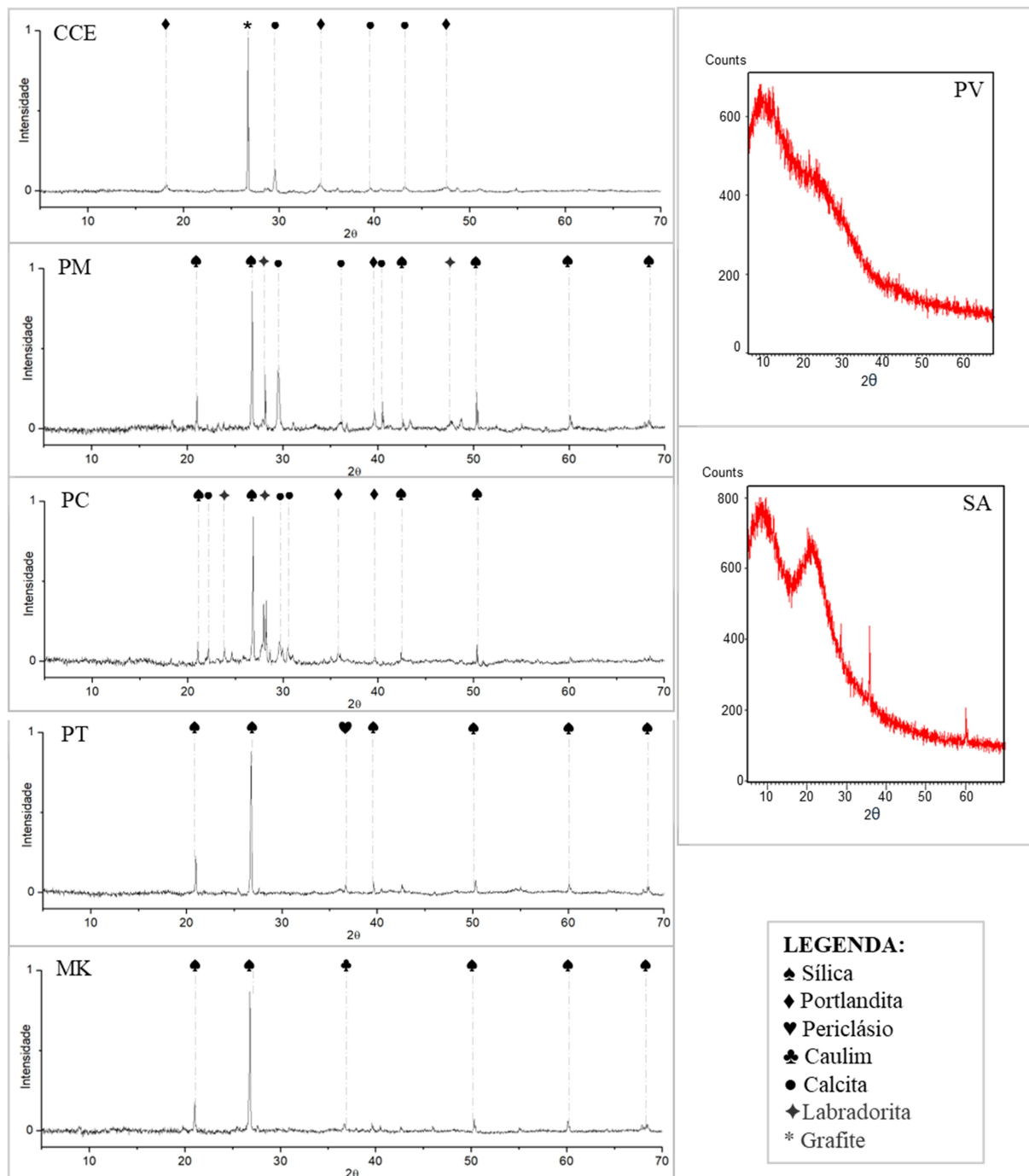


Figura 3: Difratomogramas. Fonte: Autores, 2025.

Conforme o consumo de hidróxido de cálcio (Figura 4), apenas PT pode ser considerado como pozolânico, ainda com reatividade inferior ao MK e SA. Analisando o índice de desempenho com cimento (Figura 5) percebe-se o potencial de PM no ganho de desempenho ante os demais materiais. Considerando a análise de difração de raio-X, entende-se que a composição de PC e CCE não favorece o consumo de hidróxido de cálcio e formação de C-S-H e C-A-S-H princípio da reação pozolânica (HOPPE FILHO et al., 2021; SNELLINGS, SURANENI, SKIBSTED, 2023).

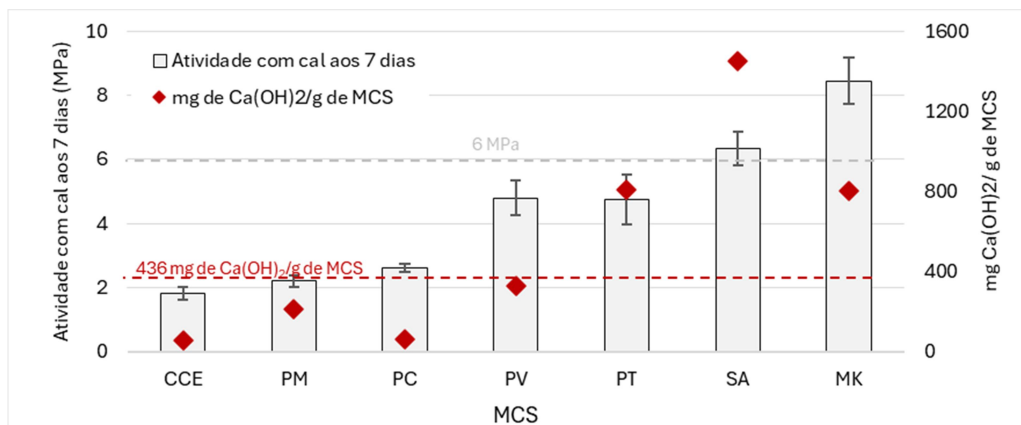


Figura 4: Atividade pozolânica. Fonte: Autores, 2025.

A ASTM C618 (2014) tem classes semelhantes à NBR 12653 (ABNT, 2014), porém considera um índice de desempenho com cimento de 75% para pozolanas, neste contexto, apenas a CCE não apresentou desempenho satisfatório (Figura 5). PC, PM podem ser explorados sob o efeito filler (PROENÇA et al., 2024; OLIVEIRA et al., 2023) PV e PT sob a atividade pozolânica (BREKAILO et al., 2022), o que não impede que ambos os materiais atuem pelos dois mecanismos, ou através de atividade hidráulica, dependendo da composição química (XU et al., 2025).

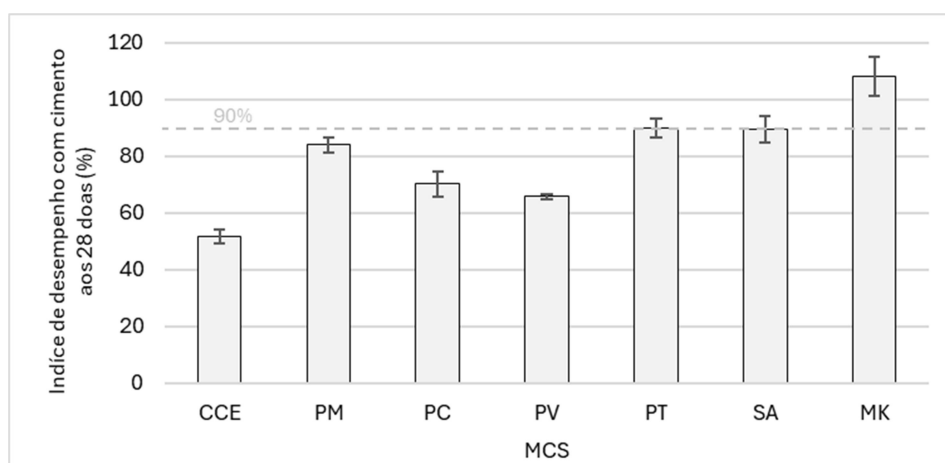


Figura 5: Atividade pozolânica. Fonte: Autores, 2025.

CONCLUSÕES

Diante do objetivo de caracterizar e avaliar quanto a reatividade os pós de resíduos de construção e demolição, resíduo de vidro, e cinzas de cavaco de eucalipto, comparando-os com materiais cimentícios suplementares (MCS) convencionais, como o metacaulim e a sílica ativa, pode-se elencar as principais conclusões:

- Quanto às características dos materiais, nota-se que a granulometria de PM, PC, PT, CCE e PV é superior à de SA e MK, sendo que para o pó de vidro esta característica prejudicou seu desempenho como pozolana, prevalecendo ante a sua formação silicosa amorfa (condição para reatividade).
- Ao verificar o consumo de hidróxido de cálcio apenas PT (pó de tijolo cerâmico) pode ser considerado pozolânico.
- No índice de desempenho com cimento, exceto para CCE (cinza de cavaco de eucalipto), os demais materiais atingiram 75% de desempenho, indicando que apesar de apenas PT reagir quimicamente, os demais materiais podem contribuir na matriz cimentícia sob efeito de enchimento, atuando como MCS.

Este estudo demonstra o potencial de atuação de materiais de origens residuais (resíduos de construção civil, vidro, cinza de biomassa), quando cominuídos na fração de pó, contribuírem na matriz cimentícia reduzindo o consumo de cimento Portland, ou podendo ser incorporados ao próprio cimento Portland, reduzindo diretamente o consumo de clínquer, gerando uma oportunidade de valoração destes resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SNIC E ABCP. **Roadmap Tecnológico do Cimento**. 2019.
2. SIDAC. **Dados Do Produto - Clínquer**. 2024. Disponível em: <https://sidac.org.br/produtos/45>. Acesso em: 8 jan. 2024.
3. HOPPE FILHO, J.; PIRES, C. A. O.; LEITE, O. D.; GARCEZ, M. R.; MEDEIROS, M. H. F. Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123653, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123653.
4. SNELLINGS, Ruben; SURANENI, Prannoy; SKIBSTED, Jørgen. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 171, p. 107199, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>.
5. BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 12, p. 3764–3773, 2014. DOI: 10.1111/jace.13177.
6. ADEDIRAN, Adeolu; VAN TRUONG, Tuan; PERUMAL, Priyadharshini. Novel non-conventional raw materials as supplementary cementitious materials for low-carbon composite cement: Chemical reactivity, fresh and hardened state characterization. **Environmental Research**, v. 271, p. 121146, 2025. DOI: 10.1016/j.envres.2025.121146.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
8. HIGUCHI, Adma Magni Darwich; MARQUES, Maria Gorett dos Santos; RIBAS, Luciane Farias; DE VASCONCELOS, Raimundo. Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 304, n. January, p. 124640, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124640.
9. BREKAILO, F.; PEREIRA, Eduardo; PEREIRA, Elias; FILHO, J. Hoppe; DE MEDEIROS, M. H. F. Evaluation of the reactive potential of additions of red ceramic waste and comminuted concrete of CDW in cement matrix. **Ceramica**, v. 65, n. 375, p. 351–358, 2019. DOI: 10.1590/0366-69132019653752552.
10. WU, Huixia; XIAO, Jianzhuang; LIANG, Chaofeng; MA, Zhiming. Properties of cementitious materials with recycled aggregate and powder both from clay brick waste. **Buildings**, v. 11, n. 3, 2021. DOI: 10.3390/buildings11030119.
11. PROENÇA, Melissa Pastorini; OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola; RISSON, Kathleen Dall Bello de Souza; POSSAN, Edna. CDW Powder Activated by Mechanical, Thermal and Tannic Acid Treatment: An Option for Circularity in Construction. **Waste and Biomass Valorization**, n. 0123456789, 2024. DOI: 10.1007/s12649-024-02802-y.
12. OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola; LEITE, Gabriela; POSSAN, Edna; MARQUES FILHO, José. Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production. **Construction and Building Materials**, v. 397, p. 132382, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382>.
13. BREKAILO, Fernanda; PEREIRA, Eduardo; PEREIRA, Elias; FARIAS, Marcelo M.; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack. **Cleaner Materials**, v. 3, p. 100034, 2022. DOI: 10.1016/J.CLEMA.2021.100034.
14. XU, Disheng et al. Reactivity assessment of silica fume and its competitive reaction in binary blended SCMs paste. **Construction and Building Materials**, v. 467, p. 140442, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140442.