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

Aproveitamento de Resíduos da Indústria Alimentícia para a Produção de Materiais Cimentícios Sustentáveis

Utilization of Food Industry Waste for the Production of Sustainable Cementitious Materials

Maysa Lorena Figueiredo Martins
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto | Brasil | maysa.lfm@gmail.com
Marcio Mateus Pimenta
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte | Brasil | marciomateus@cefetmg.br
Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte| Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

O potencial da terra diatomácea como um resíduo aproveitável, proveniente de processos de filtragem, se dá devido ao seu alto teor de silício e morfologia favorável para reações químicas. Sua granulometria refinada e estrutura amorfa indicam alta reatividade. Deste modo, foi explorada a aplicação deste resíduo como substituto parcial ao cimento Portland, visando obter um material com propriedades mecânicas, boa durabilidade e menores impactos ambientais associados à destinação de resíduos e à emissão de CO_2. A dosagem da argamassa foi realizada substituindo o cimento Portland por até 25% de resíduo diatomáceo. Ensaios de resistência à compressão e absorção de água foram realizados nos corpos de prova moldados com o traço estabelecido, comparando seu desempenho com o do cimento Portland puro. O material desenvolvido ficou próximo do limite normativo para cimentos de classe 32, ficando apenas 5% abaixo do exigido. Esse resultado demonstra o enorme potencial da utilização de resíduos na produção de materiais cimentícios sustentáveis, reforçando a viabilidade técnica e a promessa de um futuro mais verde e inovador para a construção civil.

Palavras-chave: Cimento Portland; terra diatomácea; resíduo aproveitável; filtragem; silício.

Abstract

The potential of diatomaceous earth as a valuable waste material, originating from filtration processes, is due to its high silicon content and morphology favorable for chemical reactions. Its refined granulometry and amorphous structure indicate high reactivity. Thus, the application of this waste as a partial substitute for Portland cement was explored, aiming to obtain a material with mechanical properties, good durability, and lower environmental impacts associated with waste disposal and CO_2 emissions. The mortar mix was prepared by replacing Portland cement with up to 25% diatomaceous waste. Compression strength and water absorption tests were

Como citar:
MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo; MATEUS PIMENTA, Marcio; CESAR DA SILVA BEZERRA, Augusto. Aproveitamento de resíduos da indústria alimentícia para a produção de materiais cimentícios sustentáveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

performed on the specimens molded with the established mix, comparing their performance with that of pure Portland cement. The developed material was close to the normative limit for class 32 cements, being only 5% below the required threshold. This result demonstrates the enormous potential of using waste materials in the production of sustainable cementitious materials, reinforcing the technical feasibility and the promise of a greener and more innovative future for the construction industry.

Keywords: Portland Cement; diatomaceous; waste, filtration; silicon.

INTRODUÇÃO

A reutilização da lama de filtragem formada pela terra diatomácea utilizada no processo de filtragem durante a produção de cerveja, em outras aplicações pode ter impactos positivos significativos no meio ambiente quando feita de maneira adequada. Os riscos ambientais que podem ser evitados incluem: (1) Contaminação do solo e da água: A lama de filtragem pode conter resíduos de cerveja e aditivos que podem contaminar o solo e a água se não for descartada de forma adequada. (2) Emissão de gases de efeito estufa: A produção da terra diatomácea e tratamento da lama de filtragem geralmente envolvem o uso de combustíveis, o que pode levar a emissões de gases de efeito estufa e contribuir para o aquecimento global. A utilização em outro processo faz com que minimize as emissões de CO_2. (3) Distúrbios na biodiversidade: A construção de estruturas com a lama de filtragem pode levar a distúrbios no habitat natural e a perda de habitats para a biodiversidade local. (4) Riscos à saúde humana: A lama de filtragem pode conter partículas tóxicas e resíduos de cerveja que podem ser prejudiciais à saúde humana se não for tratada de forma adequada [1,2]. Por esses motivos, é importante que a utilização da lama de filtragem após o processo de produção de cerveja, seja feita de forma responsável e seguindo as regulamentações ambientais adequadas.

A reutilização dos resíduos quando incorporados a materiais cimentícios faz com que haja um menor consumo energético, diminui as emissões de dióxido de carbono e evitam contaminação do meio ambiente [3]. Viabilizar a utilização do resíduo de filtragem da indústria cervejeira, a lama diatomácea, pode minimizar os danos causados ao ambiente, obtendo um material sustentável com valor agregado. Uma das aplicações que mostra ser eficiente é quando incorporada a materiais da construção civil, como material cimentícios suplementares e materiais álcali-ativados[4]. A utilização de resíduos na produção de materiais cimentícios é uma prática que tem ganhado cada vez mais espaço nos últimos anos. Isso se deve à sua importância para o meio ambiente e para a economia [5].

Os materiais que são elegíveis para serem utilizados como materiais cimentícios suplementares (MCS) devem possuir certas características químicas e físicas que os tornam adequados para melhorar as propriedades do concreto [6,7]. Em particular, esses materiais devem conter altos níveis de compostos pozzolânicos ou hidraulicamente ativos, como a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxidos de cálcio (CaO). Esses compostos reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, resultando na formação de compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), essenciais para a resistência e durabilidade do concreto. Neste contexto, a lama de filtragem possui altos níveis de SiO_2, o que a caracteriza como um material em potencial para ser utilizado como material cimentício suplementar [8,9].

Outro ponto crucial reside na capacidade da reutilização de resíduos na produção de cimento em reduzir a demanda por matérias-primas primárias, como minérios e minerais. Ao incorporar esses resíduos no ciclo produtivo, preservam-se de forma

significativa os recursos naturais, alinhando-se com os princípios de uma economia sustentável. Essa prática não apenas conserva recursos finitos, mas também contribui para a redução da pressão sobre ecossistemas vulneráveis que são explorados para a obtenção de matérias-primas tradicionais [10,11].
Dentro deste contexto, a utilização da lama de filtragem como material cimentício suplementar (MCS) em substituição parcial ao cimento Portland pode ser realizada, pois apresenta os requisitos adequados para ser misturada ao cimento. Esse processo pode levar à formação de produtos com uma matriz cimentícia resistente, adequada para aplicação em diversas estruturas da construção civil.
Em suma, a reutilização de resíduos na produção de cimento não apenas representa uma estratégia inteligente para maximizar a eficiência dos recursos, mas também desempenha um papel fundamental na transição em direção a práticas industriais mais sustentáveis. Ao integrar de maneira responsável esses resíduos no ciclo produtivo, não apenas se reduzem os impactos ambientais negativos, mas fortalece a base para uma economia mais circular e equilibrada [2,12–14].

MATERIAIS E MÉTODOS

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

A identificação das características físicas e químicas do resíduo é de suma importância não apenas para a eficácia da reutilização, mas também para o desenvolvimento de estratégias otimizadas que possam maximizar seu potencial de aplicação na composição de materiais cimentícios.

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E SUAS ANÁLISES

Foi realizada espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), exposto na Tabela 1, que mostraram que o resíduo é rico em dióxido de silício, com mais de 90% da sua massa constituída de SiO_2. A presença do silício com estrutura amorfa pode favorecer alguns pontos importantes na formação de um material cimentício, principalmente na composição e formação de silicatos de cálcio hidratados [15]. Em geral, a sílica favorável para aplicações em materiais cimentícios deve-se apresentar em partículas finas e amorfas [16].

Tabela 1 - Resultado do FRX do resíduo

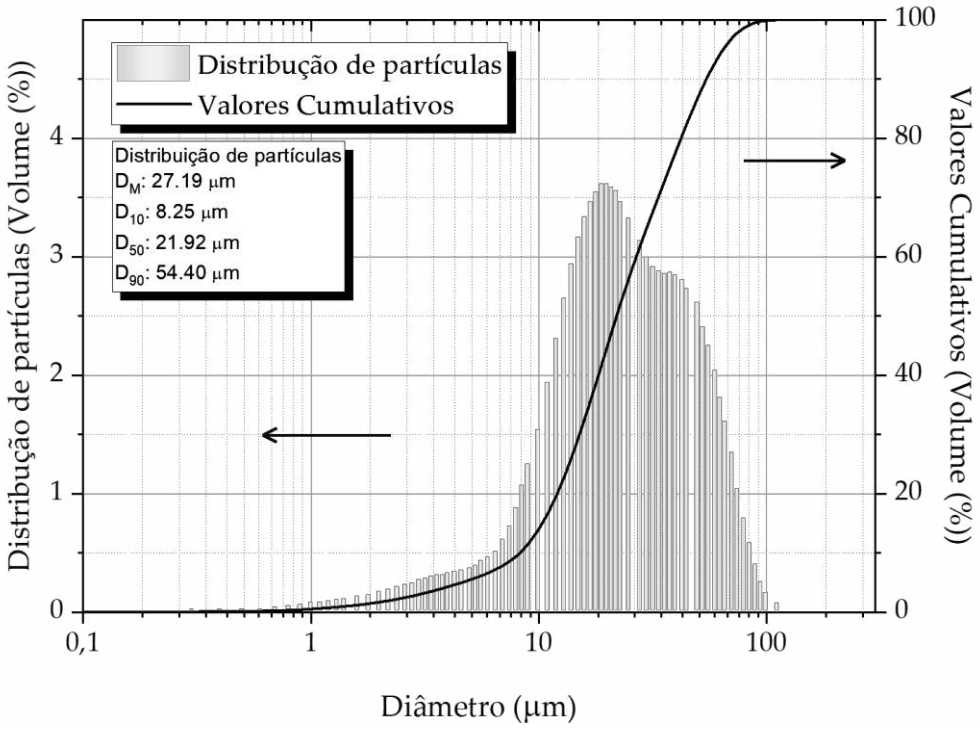
Óxidos	%
SiO_2	94,14
Al_2O_3	2,76
Fe_2O_3	1,73
CaO	0,48
SO_3	0,47
TiO_2	0,20
K_2O	0,20

Fonte: o autor.

A granulometria por difração à laser foi feita para avaliar os tamanhos das partículas presentes nas amostras. Como pode ser observado no gráfico da Figura 1, a granulometria do resíduo apresentou diâmetro médio de 27,19 µm e 90% das partículas com diâmetro inferior (D90) a 54,40 µm. A granulometria do resíduo é

próxima a do cimento, isto é, apresenta uma finura menor que 75 µm. Essas partículas com diâmetros médios baixos, faz com que haja uma superfície de contato que promova a interação ente os constituintes do material cimentício para formação de uma matriz mais densa. Deste modo, o resíduo apresenta um tamanho de partícula adequado para substituição do cimento por possuir partículas finas com maior reatividade, pela maior área superficial [17,18].

Figura 1 - Resultado da Granulometria a Laser



Fonte: o autor.

MÉTODOS

A incorporação do resíduo em substituição parcial ao cimento Portland se deu com a substituição de 25% em massa do cimento do tipo e classe CP V pelo resíduo e obteve-se uma argamassa. Seguindo este roteiro foram moldados corpos de provas seguindo parâmetros da NBR 7215 e a NBR 5752 [19,20] que estabelece rotas para produzir a argamassa com o traço descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Traços definidos para moldagem

Material	Proporção em massa	
	Referência	Com substituição
Cimento CP V	1	0,75
Resíduo	-	0,25
Areia Normalizada (NBR 7214)	3	3
Água/Aglomerante	0,48	0,48

Fonte: o autor.

Foram produzidos corpos de provas cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100 mm de altura. Sendo a moldagem deles realizadas de acordo com parâmetros da NBR 7215 e da NBR 5752 [19,20] nas quais são estabelecida a forma de compactação,

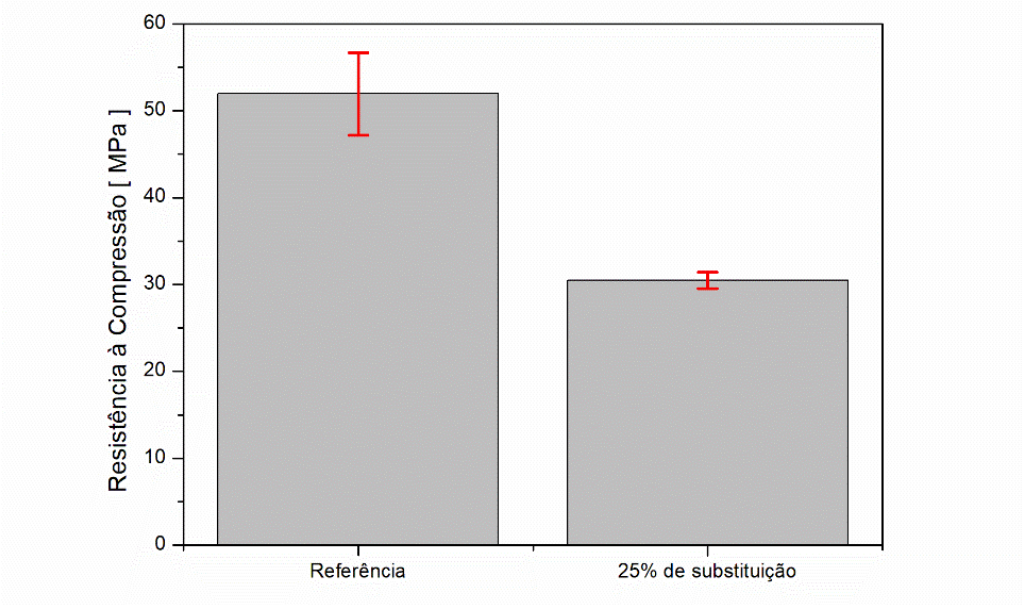
desmoldagem e cura. Os corpos de prova moldados passaram por cura de 7 dias (9 CPs) e 28 dias (19 CPs) para avaliar duas propriedades de grande relevância. A primeira foi a resistência mecânica por compressão, utilizando 10 CPs com 28 dias de cura. Deste modo os corpos de prova foram submetidos ao equipamento Universal de Ensaios da marca EMIC, com capacidade para 300 KN e taxa de incremento de tensão de 0,25MPa/s. A segunda foi o ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma NBR9778, 2009, com CPs com idades entre 7 e 28 dias, e foi possível avaliar porosidade e densidade aparente como a norma sugere.

RESULTADOS

RESISTENCIA MECÂNICA

Após 28 dias de cura, o ensaio de compressão apresentou uma resistência mecânica 4,72% inferior ao padrão estipulado pela norma NBR 16697 (2018) [21] que requer uma resistência superior a 32 MPa para os cimentos de classe 32, que podem ter uso estrutural. Conforme detalhado na Tabela 3, a resistência média alcançada foi de 30,49 MPa, inferior ao traço referência que obteve sem a substituição parcial do cimento [18]. Apesar do desempenho inferior ao estipulado em norma, uma redução abaixo de 5% indica o potencial de aplicações deste resíduo como um material cimentício suplementar (MCS).

Figura 2 - Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão: Valores Obtidos e da referência.



Fonte: o autor.

A utilização de materiais cimentícios com baixa resistência mecânica é um assunto relevante, pois eles possuem uma ampla gama de aplicações e podem ser empregados em diferentes projetos. Embora sejam considerados como materiais com resistência inferior aos cimentos convencionais, eles apresentam características interessantes que os tornam aptos para determinadas aplicações [22,23].

Uma dessas aplicações é no campo da construção civil, onde podem ser utilizados como argamassas ou concretos de baixa resistência. Por exemplo, em obras como construções de baixa altura, ou em estruturas que não exigem alta resistência, como muros de arrimo ou barreiras de contenção [24]. Além disso, estes materiais são uma alternativa mais econômica quando comparados com cimentos convencionais, o que pode ser uma vantagem importante para projetos com orçamento limitado [25].

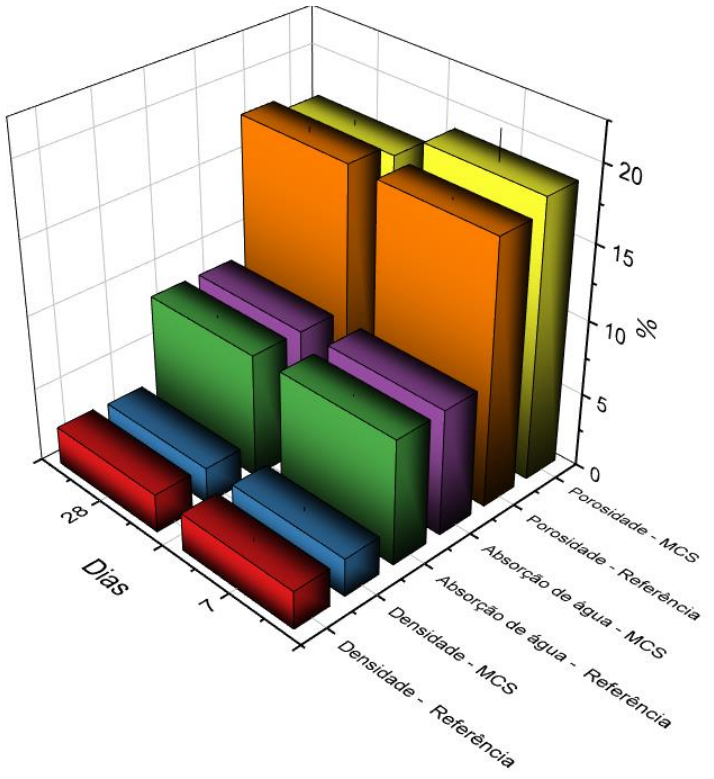
Outra aplicação importante é na produção de elementos decorativos. Materiais cimentícios com baixa resistência mecânica são comumente utilizados para a confecção de peças decorativas, como esculturas, vasos, fontes, entre outros. Estes materiais são resistentes o suficiente para suportar o peso destes elementos, mas ao mesmo tempo possuem uma textura e aparência interessantes que os tornam adequados para este tipo de aplicação[26–28].

Os materiais cimentícios com baixa resistência mecânica também são utilizados em aplicações industriais. Por exemplo, em aplicações como revestimentos de fornos, equipamentos de refrigeração, ou como material de revestimento para tanques. Nestes casos, a baixa resistência mecânica é compensada pela resistência térmica do material, o que o torna uma boa opção para estas aplicações [29].

Absorção de Água, Porosidade e Densidade Aparente

Os resultados médios de absorção de água (%), porosidade aparente (%) e densidade aparente (%) apresentados na Figura 3 indicam que houve pouca variação nos valores dos corpos de prova entre os 7 e 28 dias tanto para referência quanto para o MCS produzido.

Figura 3 - Resultado do ensaio da NBR 9778



Fonte: o autor.

A porosidade aparente mostrou-se consistente, com valores próximos de 19% para o MCS e 18% para a referência aos 7 dias, e em torno de 17% para o MCS e 18% para a referência aos 28 dias. A estabilidade dos valores desses três parâmetros ao longo deste período demonstra a consistência e a homogeneidade das amostras desde as idades iniciais.

Este comportamento consistente é interessante, pois sugere que o material possui uma estrutura interna estável e bem formada desde os estágios iniciais de cura. A manutenção dos níveis de porosidade aparente, absorção de água e densidade aparente ao longo do tempo indica que não ocorrem alterações significativas na microestrutura do material, o que pode implicar em uma durabilidade maior e melhor desempenho a longo prazo. E, a baixa variação nos resultados reforça a confiabilidade do processo de produção e a qualidade do material utilizado.

CONCLUSÃO

O resíduo da produção de cerveja utilizado apresentou composição química rica em silício e partículas com granulometria similar ao cimento, com potencial para utilização como material cimentício suplementar. O ensaio de resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo apresentou resultados inferiores ao grupo referência, entretanto resultou em um desempenho de 4,72% inferior ao estabelecido para cimentos de classe 32. Embora a resistência mecânica seja um fator importante na escolha de materiais de construção, ela não é o único critério a ser considerado. Deste modo, o uso do resíduo como material cimentício suplementar se mostra interessante por reduzir o volume de cimento consumido em construções. Outro ponto é quanto à porosidade, que afeta diretamente a densidade e a integridade estrutural dos materiais cimentícios. Uma maior porosidade geralmente implica em uma menor resistência à compressão, devido à presença de mais espaços vazios na matriz do material, o que reduz a capacidade do concreto de resistir a cargas. Além disso, a maior porosidade aumenta a propensão à entrada de íons deletérios, que podem acelerar processos de deterioração como a corrosão das armaduras e a degradação por ataque químico.

No entanto, os resultados indicam que a utilização do resíduo como material cimentício suplementar (MCS) não teve influências diretas na porosidade, densidade e absorção de água do material quando comparada o a referência. Dessa forma, a incorporação do resíduo não impactou negativamente esses aspectos, mantendo a viabilidade técnica e a integridade estrutural dos materiais cimentícios produzidos.

Em conclusão, a utilização de resíduos em materiais cimentícios pode promover a redução de emissões de carbono para produção de materiais de construção. E, por serem de baixo custo e fáceis de serem produzidos, eles podem ser uma alternativa para construções em regiões com baixa renda ou para projetos de pequena escala. No entanto, é importante lembrar que, para cada tipo de projeto, é necessário avaliar as características e propriedades específicas de cada material para garantir sua adequação e segurança no uso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] A. Ashraf, R. Ramamurthy, E.R. Rene, Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices, Sustain. Energy Technol. Assessments 47 (2021) 101432. https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101432.

[2] S.V. Bonato, D. Augusto de Jesus Pacheco, C. Schwengber ten Caten, D. Caro, The missing link of circularity in small breweries' value chains: Unveiling strategies for waste management and biomass valorization, J. Clean. Prod. 336 (2022) 130275. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.130275.

[3] J.Y. Richard Liew, M.-X. Xiong, B.-L. Lai, Special considerations for high strength materials, Des. Steel-Concrete Compos. Struct. Using High-Strength Mater. (2021) 125–142. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823396-2.00011-3.

[4] J.H. Ideker, K.L. Scrivener, H. Fryda, B. Touzo, Calcium Aluminate Cements, Lea's Chem. Cem. Concr. (2019) 537–584. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00012-5.

[5] P.-C. Aïtcin, Supplementary cementitious materials and blended cements, Sci. Technol. Concr. Admixtures (2016) 53–73. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100693-1.00004-7.

[6] L.F. de Magalhães, S. França, M. dos S. Oliveira, R.A.F. Peixoto, S.A.L. Bessa, A.C. da S. Bezerra, Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements, J. Clean. Prod. 274 (2020) 123260. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123260.

[7] M.L.F. Martins, R.R. Barreto, P.R.R. Soares Junior, I.P. Pinheiro, A.C. da S. Bezerra, Metal magnesium industry waste for partial replacement of Portland cement, Rev. IBRACON Estruturas e Mater. 13 (2020) 1–9. https://doi.org/10.1590/s1983-41952020000600011.

[8] L.R.C. Tavares, J.F.T. Junior, L.M. Costa, A.C. da Silva Bezerra, P.R. Cetlin, M.T.P. Aguilar, Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement, Sci. Rep. 10 (2020) 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w.

[9] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1244–1256. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

[10] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 1244–1256.

https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001.

[11] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry, Cem. Concr. Res. 114 (2018) 2–26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

[12] M.L.F. Martins, P.R.R. Soares Junior, T. Henrique da Silva, P. de Souza Maciel, I. Peixoto Pinheiro, A.C.S. Bezerra, Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials, Constr. Build. Mater. 310 (2021) 125172. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125172.

[13] N.C. Gomes Silveira, M.L. Figueiredo Martins, A.C. da S. Bezerra, F. Gabriel da Silva Araújo, Ecological geopolymer produced with a ternary system of red mud, glass waste, and Portland cement, Clean. Eng. Technol. 6 (2022) 100379. https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100379.

[14] L.R.C. Tavares, J.F.T. Junior, L.M. Costa, A.C. da Silva Bezerra, P.R. Cetlin, M.T.P. Aguilar, Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement, Sci. Reports 2020 101 10 (2020) 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w.

[15] M.H. Samarakoon, P.G. Ranjith, V.R.S. De Silva, Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization, (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118013.

[16] R. Siddique, N. Chahal, Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar, Resour. Conserv. Recycl. 55 (2011) 739–744. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.03.004.

[17] X. Zhang, X. Guan, C. Ma, Characterization of hydration depths of cement particles with different sizes in hardened cement-based materials, Constr. Build. Mater. 300 (2021) 123986. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123986.

[18] V.T. Nguyen, S.Y. Lee, S.Y. Chung, J.H. Moon, D.J. Kim, Effects of cement particle distribution on the hydration process of cement paste in three-dimensional computer simulation, Constr. Build. Mater. 311 (2021) 125322. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125322.

[19] ABNT, NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2019).

[20] ABNT, NBR 5752 - Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias., Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2014).

[21] ABNT, NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos, Assoc. Bras. NORMAS TÉCNICAS (2018).

[22] S.N. Shah, K.H. Mo, S.P. Yap, M.K.H. Radwan, A. El-Shafie, Chemically treated silica aerogel for the use in lightweight cementitious composite, Case Stud. Constr. Mater. 18 (2023) e01742. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01742.

[23] Z. Bayer Öztürk, T. Çam, Performance of eco-friendly fly ash-based geopolymer mortars with stone-cutting waste, Mater. Chem. Phys. 307 (2023) 128112. https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2023.128112.

[24] Y. Liao, W. Li, B. Da, Y. Meng, D. Chen, Research on properties of waste oyster shell mortar: The effect of calcination temperature of oyster shell powder, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023) e02639. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02639.

[25] E. Özçelikci, A. Oskay, İ.R. Bayer, M. Şahmaran, Eco-hybrid cement-based building insulation materials as a circular economy solution to construction and demolition waste, Cem. Concr. Compos. 141 (2023) 105149. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.105149.

[26] H.A. Subhani, R.A. Khushnood, S. Shakeel, Synthesis of recycled bricks containing mixed plastic waste and foundry sand: Physico-mechanical investigation, Constr. Build. Mater. 416 (2024) 135197. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135197.

[27] L.A.S. de Aquino, T.R.C. Silva, M. Teixeira Marvila, A.R.G. de Azevedo, Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime, Constr. Build. Mater. 353 (2022) 129111. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129111.

[28] V.F. Lotfy, A.H. Basta, E.S. Shafik, Assessment of the effect of different pulping by-products on enhancing the reuse of rubber waste in producing of cement-mortar, Int. J. Biol. Macromol. 256 (2024) 128205. https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128205.

[29] X. Ma, J. Pan, J. Cai, Z. Zhang, J. Han, A review on cement-based materials used in steel structures as fireproof coating, Constr. Build. Mater. 315 (2022) 125623. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125623.