

POTENCIAL DA CINZA DE CASCA DE ARROZ COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE ALTO E ULTRA-ALTO DESEMPENHO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Ariel de Macedo Pereira do Couto¹, Soraya de Oliveira Bandeira¹, Romina Mendez Torrez¹, Paloma Suellen Lima de Sousa¹, Isabelle Cardoso Viana¹ e Igor Campos de Almeida Lima².

¹Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação de Pesquisa e Engenharia (COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (ariel.couto@coc.ufri.br)

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo: Esta revisão narrativa analisa a cinza de casca de arroz (RHA) como substituição parcial do cimento em HPC e UHPC. A literatura indica que RHA com queima controlada e moagem adequada favorece sílica amorfa, reação pozolânica, C–S–H adicional, refinamento dos poros e menor permeabilidade. O desempenho depende da qualidade da cinza, do teor de substituição e do traço, exigindo padronização e validação em escala real.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz; concreto de alto desempenho; concreto de ultra-alto desempenho; pozolana; sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland é uma fonte relevante de emissões de CO₂, associada tanto à descarbonatação do calcário quanto ao consumo energético do processo de clínquerização (Andrew, 2019; Khaiyum et al., 2023). Diante desse impacto ambiental, materiais cimentícios suplementares têm sido investigados como alternativas para reduzir parcialmente o consumo de clínquer, mantendo desempenho mecânico e durabilidade em matrizes cimentícias (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Entre esses materiais, a cinza de casca de arroz, conhecida internacionalmente como RHA, de Rice Husk Ash, apresenta interesse técnico por derivar de um resíduo agroindustrial abundante e por poder conter elevada fração de sílica reativa quando produzida sob condições adequadas (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

A casca de arroz é um subproduto do beneficiamento do grão e representa parcela expressiva da biomassa gerada pela cadeia produtiva do arroz; após combustão, pode originar cinza com potencial de aplicação como material cimentício suplementar (Amran et al., 2021; Barbhuiya et al., 2025). A utilidade da RHA em concretos depende, sobretudo, da presença de sílica em forma amorfa, pois essa fase apresenta maior reatividade pozolânica do que formas cristalinas de sílica (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Quando a RHA é adequadamente produzida e moída, sua sílica amorfa pode reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado adicional, ou C–S–H, produto associado ao

refinamento da matriz cimentícia e à redução da porosidade capilar (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

A literatura mostra, entretanto, que o desempenho da RHA não é uniforme. A atividade pozolânica depende da temperatura de queima, do tempo de combustão, do processo de resfriamento, da finura obtida por moagem, do teor de carbono residual e da composição química da cinza (Salas et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Cinzas obtidas por queima descontrolada podem apresentar maior teor de carbono não queimado e menor proporção de sílica amorfa, o que reduz a eficiência pozolânica e pode prejudicar a trabalhabilidade do concreto (Cordeiro et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020). Por isso, a RHA deve ser discutida como material tecnicamente promissor, mas dependente de caracterização físico-química e de controle de produção (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

Em concretos de alto desempenho, ou HPC, a RHA tem sido estudada como substituição parcial do cimento e, em algumas formulações, como alternativa à sílica ativa ou como material complementar a ela (Cordeiro et al., 2009; Salas Montoya et al., 2023). Em concretos de ultra-alto desempenho, ou UHPC, seu interesse decorre da elevada demanda por finos, da necessidade de empacotamento granulométrico eficiente e da busca por matrizes de baixa permeabilidade (Mohamed et al., 2025; Barbhuiya et al., 2025). Ainda assim, os resultados relatados variam conforme o traço, o teor de substituição, a relação água/material cimentício, o tratamento da cinza e a idade de avaliação (Bui et al., 2005; Cordeiro et al.,



2009; Salas Montoya et al., 2023). Assim, não há um teor universal de RHA aplicável a todos os concretos.

O objetivo desta revisão de literatura é apresentar o potencial da cinza de casca de arroz como substituição parcial do cimento Portland em concretos estruturais de alto desempenho e de ultra-alto desempenho. Busca-se discutir como as condições de produção da cinza, os tratamentos aplicados, a finura e os teores de substituição influenciam as propriedades mecânicas, a durabilidade e as possibilidades de aplicação estrutural da RHA (Amran et al., 2021; Salas Montoya et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025). A revisão também procura destacar limitações técnicas ainda existentes, especialmente quanto à variabilidade do material, à padronização da cinza e à necessidade de estudos em escala real e de longa duração (Thiedeitz et al., 2020; Endale et al., 2023; Mohamed et al., 2025).

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica narrativa sobre o uso da cinza de casca de arroz (RHA) como substituição parcial do cimento em concretos estruturais de alto desempenho e de ultra-alto desempenho. A busca bibliográfica foi realizada em junho de 2026, no Google Acadêmico e no Portal de Periódicos CAPES. As palavras-chave utilizadas em inglês foram “rice husk ash”, “rice husk ash blended cement”, “high-performance concrete”, “ultra-high-performance concrete” e “pozzolanic reactions”. Foram selecionados artigos de revisão e estudos experimentais sobre o uso da RHA em materiais cimentícios, dando prioridade a trabalhos recentes que trouxessem informações mais detalhadas sobre a produção, a composição, a atividade pozolânica, as propriedades mecânicas, a durabilidade, a sustentabilidade e o potencial de aplicação estrutural da RHA, especialmente em concretos de alto e ultra-alto desempenho. Também foram considerados trabalhos publicados em anos anteriores que analisaram a influência da moagem, do tratamento da cinza e dos diferentes teores de substituição do cimento por RHA em concretos. Foram excluídos estudos sem relação direta com a utilização da RHA em materiais cimentícios e publicações que não traziam dados relevantes para os objetivos da revisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção e caracterização da cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz é obtida pela combustão da casca de arroz, resíduo agroindustrial gerado durante o beneficiamento do grão (Amran et al., 2021; Barbhuiya et al., 2025). Após a queima, a cinza pode ser submetida à moagem para reduzir o tamanho das partículas, aumentar a área superficial específica e favorecer sua reatividade em sistemas cimentícios

(Bui et al., 2005; Cordeiro et al., 2009). A qualidade final da RHA depende de variáveis de processamento, como temperatura de queima, tempo de combustão, taxa de resfriamento, teor de carbono residual e grau de moagem (Salas et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021).

A literatura enfatiza que a RHA não deve ser considerada um material homogêneo, pois cinzas produzidas por diferentes processos podem apresentar composições, morfologias e reatividades muito distintas (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021; Endale et al., 2023). Por esse motivo, sua utilização em concreto exige caracterização prévia, incluindo análise química, avaliação da finura, determinação da perda ao fogo, identificação da fase amorfa/cristalina da sílica e verificação de atividade pozolânica (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021; Barbhuiya et al., 2025). Essa variabilidade ajuda a explicar por que diferentes estudos relatam respostas distintas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade para concretos contendo RHA (Bui et al., 2005; Cordeiro et al., 2009; Endale et al., 2023).

Influência da temperatura de queima

A temperatura de queima é determinante para a estrutura da sílica presente na RHA. Queimas controladas tendem a favorecer a formação de sílica amorfa, enquanto temperaturas excessivas ou tempos prolongados de exposição térmica podem induzir a cristalização da sílica, reduzindo a atividade pozolânica da cinza (Salas et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Além da temperatura, o tempo de combustão, o resfriamento e o tipo de equipamento de queima também influenciam a composição final da cinza (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021).

Não é tecnicamente seguro indicar uma temperatura única e universal como condição ótima para todas as RHAs. A faixa adequada depende do tipo de forno, da atmosfera de combustão, da taxa de aquecimento, do tempo de permanência e das características da casca de arroz utilizada (Salas et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020). O critério técnico mais importante é obter uma cinza com baixa perda ao fogo, baixa fração de carbono residual e predominância de sílica amorfa, preservando a reatividade pozolânica do material (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021; Salas Montoya et al., 2023).

Características físicas e composição química

Fisicamente, a RHA pode apresentar partículas porosas, irregulares e de elevada área superficial específica, características que favorecem tanto o efeito filler quanto a reação pozolânica quando a cinza é adequadamente processada (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023). Entretanto, essa mesma elevada área superficial pode aumentar a demanda de água ou



de aditivos superplastificantes, especialmente quando a cinza apresenta alto teor de carbono residual ou moagem insuficiente (Cordeiro et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020). Assim, o uso de RHA em HPC e UHPC exige compatibilização entre finura, trabalhabilidade, relação água/material cimentício e dosagem de aditivos químicos (Cordeiro et al., 2009; Salas Montoya et al., 2023).

Do ponto de vista químico, a RHA é caracterizada por elevado teor de dióxido de silício, embora também possa conter óxidos minoritários, como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e outros constituintes dependentes da origem da casca e do processo de queima (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023). O teor total de SiO_2 , isoladamente, não garante bom desempenho pozolânico, pois a reatividade depende da fração amorfa da sílica, da finura da cinza e da disponibilidade dessa sílica para reagir com o hidróxido de cálcio (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Portanto, duas cinzas com teores semelhantes de sílica podem apresentar desempenhos distintos caso tenham sido produzidas por rotas térmicas e mecânicas diferentes (Salas et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020).

Sílica amorfa e atividade pozolânica

A atividade pozolânica da RHA está associada principalmente à reação da sílica amorfa com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento Portland (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023). Essa reação gera C–S–H adicional, que contribui para densificar a matriz cimentícia, reduzir a porosidade capilar e melhorar a ligação entre pasta e agregados (Amran et al., 2021; Barbhuiya et al., 2025). O efeito combinado da reação pozolânica e do preenchimento físico de vazios ajuda a explicar os ganhos relatados em resistência e durabilidade quando a cinza apresenta finura e reatividade adequadas (Bui et al., 2005; Cordeiro et al., 2009; Endale et al., 2023).

Esse mecanismo, contudo, depende de controle tecnológico. Teores excessivos de substituição, moagem insuficiente, alto teor de carbono residual ou baixa fração de sílica amorfa podem limitar a reação pozolânica e reduzir os benefícios esperados (Cordeiro et al., 2009; Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021). Dessa forma, a RHA não deve ser incorporada ao concreto apenas como substituição volumétrica ou mássica direta do cimento, mas como material cimentício suplementar que exige caracterização, ajuste de traço e validação experimental (Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025).

Propriedades mecânicas, teor de substituição e resistência a cloretos

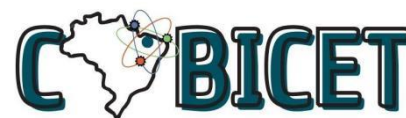
O teor adequado de substituição por RHA depende da qualidade da cinza, da finura, da relação água/material

cimentício, do tipo de concreto, da idade de cura e da propriedade avaliada (Bui et al., 2005; Cordeiro et al., 2009; Endale et al., 2023). Em concretos de alto desempenho, Cordeiro et al. 2009 avaliaram concretos com substituição de cimento por RHA ultrafina em teores de 10%, 15% e 20%, mostrando que a moagem pode melhorar o desempenho de cinzas residuais mesmo quando apresentam teor elevado de carbono. Bui et al. (2005) também demonstraram que o tamanho das partículas de RHA influencia a resistência de concretos com cimento Portland, indicando a importância da finura e do empacotamento granulométrico.

Em estudo experimental com HPC, Salas Montoya et al. (2023) avaliaram substituição de 10% do cimento por RHA, por RHA tratada química e termicamente, denominada TRHA, e por sílica ativa. No traço estudado, a mistura com TRHA apresentou resistência à compressão de 49,2 MPa aos 28 dias e 58,0 MPa aos 180 dias, enquanto o concreto de referência apresentou 42,2 MPa e 51,5 MPa, respectivamente (Salas Montoya et al., 2023). Os autores também relataram aumento da resistência à flexão e módulo de elasticidade superior para a mistura com TRHA em comparação ao concreto de referência, indicando que o tratamento da cinza pode elevar sua reatividade e melhorar o desempenho mecânico do HPC (Salas Montoya et al., 2023).

Apesar desses resultados, não há uma porcentagem única de RHA aplicável a todos os concretos. Revisões recentes indicam que teores da ordem de 10% a 20% são frequentemente reportados como tecnicamente promissores, mas o teor ótimo depende do traço, da cinza e do critério de desempenho adotado (Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025). Em UHPC, Mohamed et al. (2025) discutem que a RHA pode contribuir para o empacotamento de partículas e para a formação de uma matriz densa, mas destacam que a otimização do teor de substituição deve considerar resistência, trabalhabilidade, durabilidade e impacto ambiental. Portanto, a conclusão mais segura é que a definição do teor de RHA exige validação específica para cada formulação (Cordeiro et al., 2009; Salas Montoya et al., 2023; Mohamed et al., 2025).

Quanto à resistência à penetração de cloretos, a RHA pode contribuir para menor permeabilidade quando favorece a formação de C–S–H adicional e o refinamento da rede de poros (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025). No ensaio ASTM C1202 realizado por Salas Montoya et al. (2023), aos 56 dias, o concreto de referência apresentou 3529 coulombs, enquanto as misturas com RHA, TRHA e sílica ativa apresentaram 1413, 960 e 970 coulombs, respectivamente. Esses valores indicam que, no traço avaliado, a TRHA reduziu substancialmente a passagem de carga elétrica e



apresentou desempenho próximo ao da sílica ativa em relação à resistência à penetração de cloretos (Salas Montoya et al., 2023). Essa evidência, contudo, refere-se ao traço específico estudado e não deve ser generalizada para qualquer RHA ou qualquer teor de substituição.

Durabilidade em UHPC e HPC: cloretos, sulfatos, carbonatação, corrosão e gelo-degelo

A contribuição da RHA para a durabilidade decorre da combinação entre reação pozolânica, formação adicional de C–S–H, refinamento dos poros e redução da conectividade capilar (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025). Em concretos de baixa permeabilidade, como HPC e UHPC, esses mecanismos podem dificultar a entrada de água, cloretos e outros agentes agressivos, desde que a cinza apresente qualidade adequada e seja corretamente dosada (Salas Montoya et al., 2023; Mohamed et al., 2025). Por isso, a literatura associa a RHA de boa reatividade à melhoria potencial da durabilidade, especialmente em relação à penetração de cloretos e à permeabilidade (Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

Em relação ao ataque por sulfatos, a RHA pode contribuir para o desempenho por consumir parte do hidróxido de cálcio e densificar a matriz, reduzindo a entrada de soluções agressivas e a disponibilidade de fases suscetíveis a reações deletérias (Hu et al., 2020; Mohamed et al., 2025) relataram melhoria da resistência a sulfatos em pastas contendo RHA, associando esse resultado à estabilização do C–S–H e ao refinamento da estrutura de poros. Ainda assim, o benefício frente a sulfatos depende do tipo de sulfato, do teor de substituição, do grau de reação da cinza e das condições de exposição, não devendo ser apresentado como efeito automático ou universal (Hu et al., 2020; Mohamed et al., 2025).

A carbonatação deve ser discutida com cautela. A densificação da matriz pode dificultar a entrada de CO₂, mas a reação pozolânica também consome parte do hidróxido de cálcio, alterando a reserva alcalina do sistema (Salas Montoya et al., 2023; Mohamed et al., 2025). No estudo de Salas Montoya et al. (2023), após exposição acelerada, as profundidades de carbonatação foram de 0,10 cm para o concreto de referência, 0,20 cm para RHA, 0,20 cm para TRHA e 0,15 cm para sílica ativa; contudo, os autores indicaram que as diferenças não foram significativas nas condições avaliadas. Portanto, para carbonatação, é inadequado afirmar de forma absoluta que a RHA sempre melhora o desempenho; o efeito depende do balanço entre densificação microestrutural, consumo de alcalinidade e condições de exposição (Salas Montoya et al., 2023; Mohamed et al., 2025).

Quanto à corrosão das armaduras, a RHA pode contribuir indiretamente ao reduzir a entrada de

cloretos, água e CO₂ quando promove uma matriz mais densa e menos permeável (Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025). Essa afirmação não equivale a dizer que a RHA elimina a corrosão, mas apenas que pode retardar condições que favorecem seu início em concretos bem dosados e adequadamente curados (Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025). Em ciclos de congelamento e degelo, a menor absorção de água e a redução da conectividade de poros podem favorecer o desempenho, mas essa conclusão exige ensaios específicos e avaliação das condições ambientais de uso (Mohamed et al., 2025). Assim, a literatura recomenda estudos de longa duração e monitoramento em estruturas reais para confirmar o desempenho de concretos com RHA sob exposições combinadas (Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025).

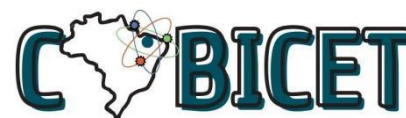
Potencial de aplicação estrutural

A RHA apresenta potencial para aplicação em concretos estruturais quando sua qualidade é controlada e sua dosagem é compatível com os requisitos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025). Em HPC, estudos experimentais indicam que a RHA pode atuar como material cimentício suplementar, contribuindo para o refinamento da microestrutura e para a redução da permeabilidade, especialmente quando apresenta alta reatividade ou passa por tratamento adequado (Cordeiro et al., 2009; Salas Montoya et al., 2023). Em UHPC, o interesse pela RHA está relacionado à elevada demanda por partículas finas, ao empacotamento granulométrico e à possibilidade de reduzir parcialmente o consumo de cimento em matrizes de alto desempenho (Mohamed et al., 2025; Barbhuiya et al., 2025).

Apesar desse potencial, a aplicação estrutural em larga escala ainda exige prudência. Grande parte dos resultados disponíveis provém de corpos de prova moldados e curados em laboratório, o que limita a extrapolação direta para elementos estruturais reais submetidos a carregamentos, variações ambientais e processos de envelhecimento de longo prazo (Thiedeitz et al., 2020; Mohamed et al., 2025). Para consolidar o uso da RHA em infraestrutura, são necessários estudos com elementos estruturais em escala real, avaliação sob carregamento efetivo, monitoramento de durabilidade e controle da variabilidade entre lotes de cinza (Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025). Portanto, o potencial estrutural existe, mas depende de padronização do material e validação tecnológica.

Sustentabilidade, limitações e perspectivas

A substituição parcial do cimento por RHA pode contribuir para reduzir o consumo de clínquer e para dar destinação de maior valor agregado a um resíduo



agroindustrial abundante (Amran et al., 2021; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025). Considerando que a produção de cimento está associada a emissões relevantes de CO₂, a redução parcial do teor de cimento por materiais cimentícios suplementares pode contribuir para estratégias de mitigação ambiental no setor da construção (Andrew, 2019; Khaiyum et al., 2023). Além disso, o uso de RHA se alinha a princípios de economia circular, pois transforma um resíduo agrícola em insumo técnico para materiais cimentícios (Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

Entretanto, a sustentabilidade da RHA não deve ser presumida sem considerar seu processo de produção. A queima controlada, a moagem, o transporte e a eventual preparação química da cinza também consomem energia e podem influenciar o balanço ambiental do material (Salas et al., 2009; Hu et al., 2020; Thiedeitz et al., 2020). Por isso, avaliações ambientais devem considerar o ciclo de vida e não apenas a redução percentual de cimento no traço (Hu et al., 2020; Endale et al., 2023). A variabilidade da cinza permanece como uma das principais limitações para o uso industrial, pois diferenças na origem da casca, no processo de combustão, na finura e no teor de carbono residual podem alterar significativamente o desempenho do concreto (Thiedeitz et al., 2020; Amran et al., 2021; Barbhuiya et al., 2025).

As perspectivas futuras envolvem padronização físico-química da RHA, definição de critérios de aceitação para uso como material cimentício suplementar, otimização de teores de substituição em HPC e UHPC e estudos de durabilidade em escala real (Barbhuiya et al., 2025; Mohamed et al., 2025). Também são necessários ensaios de longo prazo envolvendo carbonatação, penetração de cloretos, ataque por sulfatos, retração, fluência, reação álcali-agregado e desempenho sob carregamento estrutural (Hu et al., 2020; Mohamed et al., 2025). Dessa forma, a RHA pode avançar de um material promissor em laboratório para uma alternativa tecnicamente confiável em aplicações estruturais, desde que sua produção, caracterização e dosagem sejam controladas (Thiedeitz et al., 2020; Endale et al., 2023; Barbhuiya et al., 2025).

CONCLUSÃO

A literatura analisada indica que a cinza de casca de arroz apresenta potencial técnico e ambiental para uso como material cimentício suplementar em concretos de alto desempenho e de ultra-alto desempenho, desde que sua produção seja adequadamente controlada. A obtenção de uma cinza com predominância de sílica amorfa, associada à moagem e à dosagem compatíveis com o traço, favorece a atividade pozolânica, a formação adicional de C–S–H e o refinamento da matriz cimentícia. Esses mecanismos podem contribuir para a melhoria de propriedades mecânicas

e, especialmente, para a redução da permeabilidade e da penetração de agentes agressivos, como cloretos. Entretanto, os resultados reunidos não permitem estabelecer um teor ótimo universal de substituição do cimento por RHA, pois o desempenho depende da composição físico-química da cinza, da finura, do tratamento aplicado, da relação água/material cimentício, das condições de cura e da idade de avaliação. Assim, a RHA deve ser compreendida como uma alternativa promissora para a produção de concretos estruturais mais ecoeficientes, mas sua aplicação em larga escala ainda exige padronização do material, controle rigoroso do processo de produção e estudos de longa duração em elementos estruturais submetidos a condições reais de carregamento e exposição ambiental.

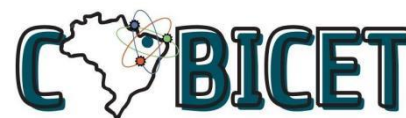
AGRADECIMENTOS

S.O.B. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa, processo nº 130848/2026-3.

P.S.L.S. agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa, processo nº 88887.275407/2026-00.

REFERÊNCIAS

- AMRAN, Mugahed; FEDIUK, Roman; MURALI, Gunasekaran; VATIN, Nikolai; KARELINA, Maria; OZBAKKALOGLU, Togay; KRISHNA, R. S.; SAHOO, Ankit Kumar; DAS, Shaswat Kumar; MISHRA, Jyotirmoy. Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications. **Crystals**, v. 11, art. 168, 2021.
- ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 2019.
- BARBHUIYA, Salim; DAS, Bibhuti Bhusan; ADAK, Dibyendu; RAJPUT, Aditya; KATARE, Vasudha. Rice husk ash in structural concrete: influence on strength, durability and sustainability. **Discover Concrete and Cement**, v. 1, art. 14, 2025.
- BUI, D. D.; HU, J.; STROEVEN, P. Particle size effect on the strength of rice husk ash and blended gap-graded Portland cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 3, p. 357–366, 2005.
- CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. **Materials and Structures**, v. 42, p. 983–992, 2009.
- ENDALE, S. A.; ABEJE, A. A.; AYNES, B. D. Rice Husk Ash in Concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 1, art. 137, 2023.



HU, L.; HE, Z.; ZHANG, S. Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: environmental evaluation and performance improvement. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, art. 121744, 2020.

KHAIYUM, Mohammad Zahirul; SARKER, Sudipa; KABIR, Golam. Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. **Sustainability**, v. 15, n. 21, art. 15407, 2023.

MOHAMED, Abdeliazim Mustafa; TAYEH, Bassam A.; MAJEED, Samadar S.; ABU AISHEH, Yazan Issa; ARIFFIN, Mohd Azreen Bin Mohd. Optimizing rice husk ash for ultra-high-performance concrete: a comprehensive review of mechanical properties, durability, and environmental benefits. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 64, n. 1, art. 20250146, 2025.

SALAS, Andrés; DELVASTO, Silvio; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; LANGE, David. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 773–778, 2009.

SALAS MONTTOYA, Andres; CHUNG, Chul-Woo; KIM, Ji-Hyun. High Performance Concretes with Highly Reactive Rice Husk Ash and Silica Fume. **Materials**, v. 16, art. 3903, 2023.

THIEDEITZ, Mareike; SCHMIDT, Wolfram; HÄRDER, Michelle; KRÄNKEL, Thomas. Performance of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material after Production in the Field and in the Lab. **Materials**, v. 13, n. 19, art. 4319, 2020.