Avaliação do potencial de resíduos industriais do Ceará para aplicação em materiais construtivos

Assessment of the potential use of industrial waste from Ceará in construction materials

Elói Romão dos Santos Souza
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | eloirsouza@alu.ufc.br

Brendda Karen Oliveira Magalhães
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | brendda@alu.ufc.br

Elidiel Peixinho de Almeida
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | elidiel@alu.ufc.br

Myckelle Michely da Silva Ferreira
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | myckelleferreira@ufc.br

Laís Cristina Barbosa Costa
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | laiscosta@ufc.br

RESUMO

A geração de resíduos industriais e a demanda por materiais de construção mais ecológicos impulsionam a reinserção desses subprodutos na cadeia produtiva. Este estudo investiga o potencial de aproveitamento de resíduos industriais do Ceará na produção de materiais construtivos sustentáveis. A metodologia abrange mapeamento, coleta, preparação e caracterização dos resíduos. Foram selecionados subprodutos de diferentes localidades do Ceará, como escória de aciaria, cinza de forno de olaria e resíduo de pedra Cariri, cujas propriedades são compatíveis com sua aplicação. Os resultados apontam que o reaproveitamento desses materiais contribui para a redução dos impactos ambientais e fortalece práticas sustentáveis na construção civil, alinhando-se à economia circular.

Palavras-chave: Construção civil; Sustentabilidade; Materiais alternativos; Resíduos industriais; Economia circular.

ABSTRACT

The generation of industrial waste and the demand for more eco-friendly construction materials drive the reintegration of these by-products into the production chain. This study investigates the potential utilization of industrial waste from Ceará in the production of sustainable construction materials. The methodology includes mapping, collection, preparation, and characterization of the waste. By-products from different locations in Ceará, such as steel slag, brick kiln ash, and Cariri stone waste, were selected based on their suitable properties. The results indicate that repurposing these materials helps reduce environmental impacts and strengthens sustainable practices in construction, aligning with the principles of the circular economy.

Keywords: Civil construction; Sustainability; Alternative materials; Industrial waste; Circular economy.

1 INTRODUÇÃO

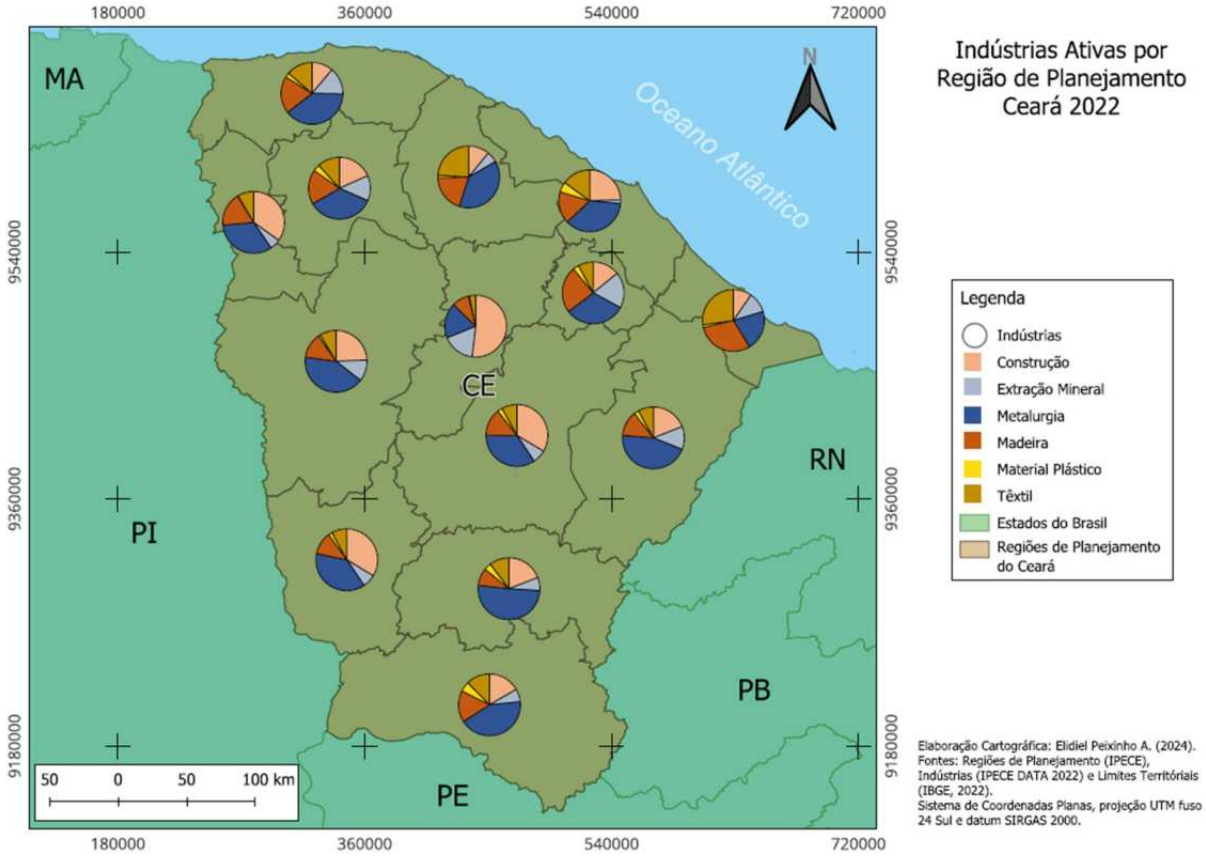
As decisões na construção civil impactam as mudanças climáticas, o consumo de energia e os setores econômico e social (Chen *et al.,* 2024). O uso excessivo de recursos não renováveis pela indústria construtiva e a produção de resíduos industriais diversos representam desafios ambientais significativos (Zamora-Castro *et al*., 2021). Com as crescentes demandas por sustentabilidade, surge a oportunidade de integrar resíduos industriais em materiais de construção como solução sustentável.

A utilização de resíduos como insumo para o setor da construção traz benefícios da diminuição do consumo de recursos naturais, reinserção de resíduos na cadeia produtiva e a promoção de um ambiente mais sustentável (Antunes *et al*., 2024; Pereira *et al.,* 2025). Além de incentivar a inovação tecnológica no setor, abrindo espaço para o desenvolvimento de materiais mais eficientes e econômicos.

Diversos resíduos têm sido avaliados para a fabricação de materiais de construção (Briga-Sa *et al.,* 2022; Mendes et al., 2020). A exploração de resíduos industriais tem se mostrado bem-sucedida, como o uso de escórias de alto-forno como adições minerais no cimento (Xue *et al.,* 2016) e a utilização de cinza volante, que tem se mostrado eficaz no aumento da durabilidade e resistência química dos compósitos cimentícios (Jin *et al.,* 2025).

O Ceará possui o terceiro maior PIB do Nordeste, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024). Em 2024, os setores metalúrgico e têxtil foram os principais responsáveis por esse desempenho, contribuindo com 28,9% e 25,8%, respectivamente. A Figura 1 apresenta as indústrias ativas por região do estado, evidenciando a predominância dessas atividades em diversas áreas.

Figura 1: Mapa de indústrias ativas no estado do Ceará elaborado com base nos dados IPECE DATA (2022).



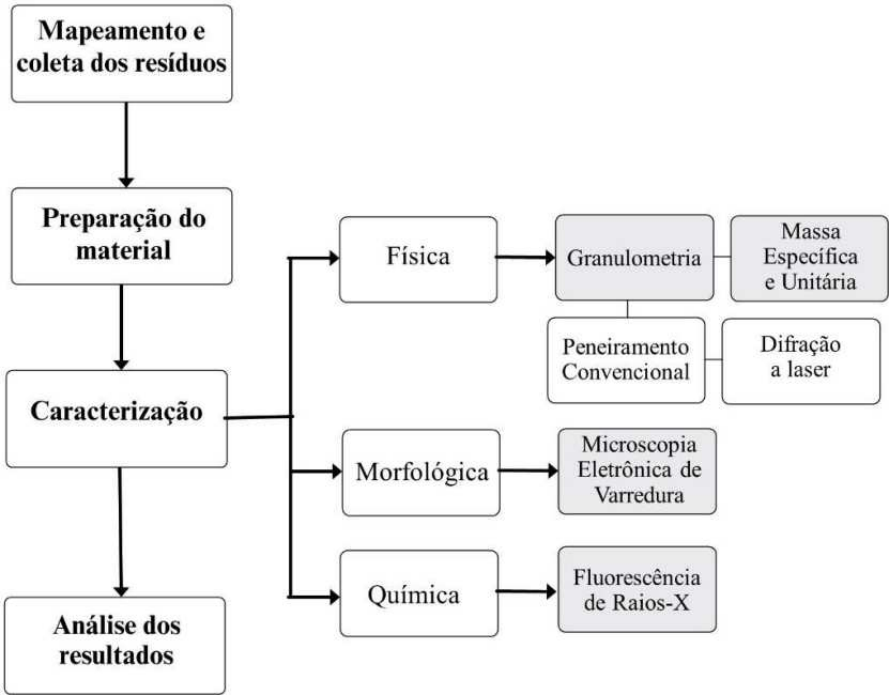
Fonte: os autores (2025).

As atividades industriais geram grandes volumes de resíduos, com destaque para escórias, cinzas de forno de olaria e resíduos da extração de pedra ornamental, que se destacam no Ceará. Este estudo investiga o potencial de aproveitamento desses resíduos por meio de caracterizações macro e microestruturais, visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais de construção de baixo impacto ambiental, fomentando soluções inovadoras que conciliem avanço tecnológico e sustentabilidade no setor construtivo.

2 METODOLOGIA

Este trabalho é definido como pesquisa experimental. Para desenvolvimento, foi realizado um mapeamento das indústrias presentes em cada região do estado do Ceará, em seguida, de acordo com a disponibilidade, foi realizada a coleta do resíduo para o seu devido preparo, e posteriormente, foram desenvolvidos ensaios de caracterização para análise da viabilidade da sua reutilização, conforme fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.



Fonte: os autores (2025).

2.1 MATERIAIS

Foram selecionados resíduos industriais de três setores distintos: siderúrgica (Pecém – CE), cerâmica vermelha (Russas – CE) e extração de pedra ornamental (Nova Olinda – CE), apresentados na Figura 3. A escolha dessas indústrias fundamenta-se em sua representatividade nas principais regiões do Ceará e em sua importância econômica, sendo a siderurgia predominante no litoral, a cerâmica vermelha amplamente distribuída no Vale do Jaguaribe e a extração de pedra ornamental consolidando a economia do Cariri.

Figura 3: Resíduos industriais gerados no Ceará: a) escória do tipo BSSF, b) cinza de forno e c) resíduo de pedra Cariri.



Fonte: os autores (2025).

O resíduo siderúrgico selecionado foi a escória de aciaria do tipo *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF), coletada no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, fornecida pela Arcelor Mittal. O resíduo da indústria cerâmica selecionado foi a cinza de fornos (CF) da olaria Cerâmica do Liro, utilizada como combustível em fornos. O resíduo da Pedra Cariri (RPC) foi obtido durante o processo de corte da pedra ornamental na mineradora Pedra Cariri Dois Irmãos. Também foi utilizada uma areia quartzosa para fins comparativos. O agregado miúdo

convencional utilizado na pesquisa foi proveniente da cidade de Russas (CE), que tem massa específica de 2,61 g/cm³ e Dimensão Máxima Caraterística de 2,36mm.

2.2 MÉTODOS

As amostras de todos os resíduos em sua forma bruta foram quarteadas. Em seguida, as frações selecionadas foram submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, com o objetivo de eliminar toda a umidade residual presente nos materiais. Após a secagem, os torrões formados foram desintegrados manualmente utilizando um almofariz.

A análise granulométrica por peneiramento seguiu as diretrizes da NBR 17054 (ABNT, 2022). A fim de complementar a curva granulométrica dos materiais caracterizados por peneiramento, foi realizada também a granulometria por difração à laser (Bettersize 2000) do material passante na peneira de 2,0mm usando água destilada como meio dispersor.

A determinação da massa específica dos resíduos seguiu dois métodos. Devido à granulometria fina das amostras de CF e RPC, adotou-se a NBR 16605 (ABNT, 2017). Para BSSF, utilizou-se a NBR 16916 (ABNT, 2021), específica para materiais granulares. A massa unitária foi obtida conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021).

A composição química dos materiais utilizados como agregados foi obtida por fluorescência de raios-X (FRX) utilizando como aparelhagem o PANalytical Epsilon 3x. Para realização do ensaio os materiais foram cominuídos até serem passantes na peneira de 75µm e submetidos ao ensaio de perda ao fogo a 1000°C.

A morfologia das partículas foi observada por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando o microscópio de modelo TESCAN – Vega XMU com detector de elétrons secundários. As partículas analisadas possuíam dimensões inferiores a 600µm e foram fixadas em um porta amostra metálico utilizando fita de carbono condutora, sem metalização.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A composição química dos resíduos industriais (Quadro 1) confirma a predominância de Fe_2O_3 na escória BSSF, alinhando-se com sua origem siderúrgica. Além disso, a presença significativa de SiO_2 reforça sua semelhança com materiais arenosos. A CF apresenta elevada presença de CaO, associada ao insumo utilizado nos fornos (resíduos da indústria têxtil). Além disso, o óxido de cromo III (Cr_2O_3) e o MgO são detectados. A presença de Cr_2O_3, dependendo da fase em que se encontra, indica a possibilidade de técnicas de estabilização para evitar problemas em características e produtos de hidratação em materiais cimentícios (Trezza, Scian, 2007). Já o RPC é predominantemente composto por CaO, refletindo sua origem sedimentar rica em carbonatos.

Quadro 1: Análise química semiquantitativa e perda ao fogo dos resíduos industriais.

Componente	Escória BSSF (%)	Cinza de forno (%)	Resíduo de pedra Cariri (%)
CaO	38,45	25,93	51,11
Fe_2O_3	30,66	1,38	0,82
SiO_2	12,27	3,99	0,56
MgO	4,96	4,31	1,87
Al_2O_3	3,36	2,74	0,22
MnO	3,44	0,317	0,258
P_2O_5	1,88	2,87	-
NaO_2	0,44	3,59	-
SO_3	0,19	0,99	0,16
Cr_2O_3	0,48	24,45	-
Perda ao fogo	2,91	25,14	44,85

Fonte: os autores (2025).

As características físicas dos materiais estão presentes na Tabela 1, incluindo a areia quartzosa de rio da região como referência de agregado convencional. A BSSF destaca-se pela maior massa específica, aproximadamente 50% superior à da areia quartzosa. Apesar dessa diferença, concretos e argamassas contendo escória podem atender aos requisitos normativos de densidade (Tang *et al*., 2025). O RPC possui massa específica semelhante à da areia quartzosa, uma vez que ambos são materiais não metálicos compostos por minerais leves, viabilizando sua aplicação como substituto do agregado miúdo em compósitos cimentícios. Por outro lado, a CF apresenta massa específica cerca de 20% superior à do agregado miúdo convencional, devido à presença de óxidos metálicos e elementos residuais da combustão.

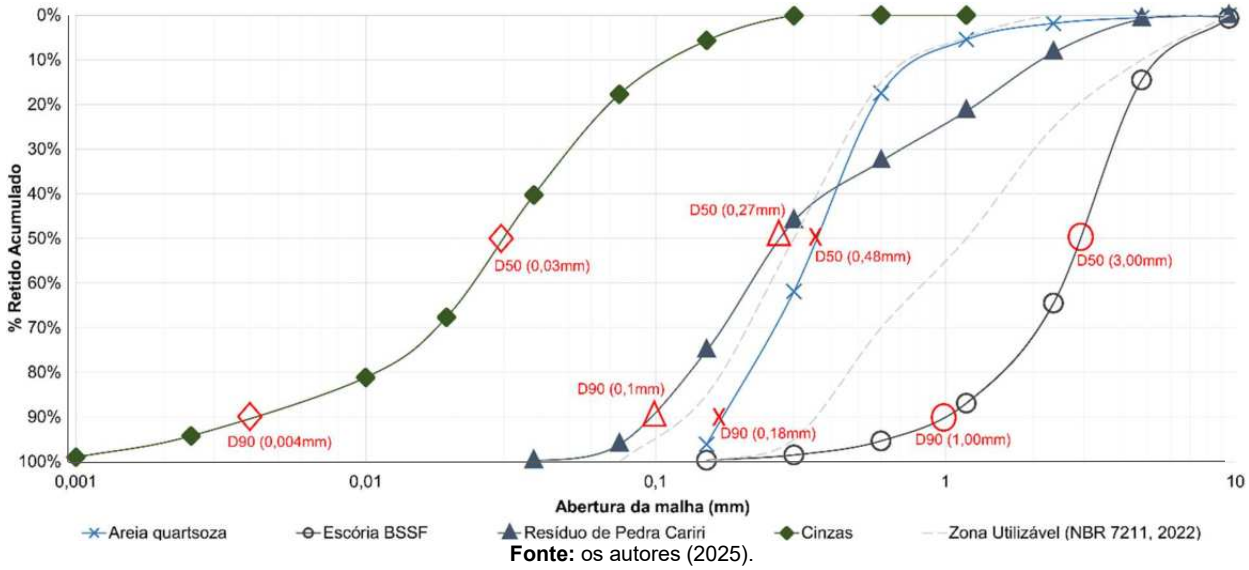
Tabela 1: Massa específica e unitária dos materiais.

Característica	Escória BSSF	Cinza de forno	Resíduo de pedra Cariri	Areia quartzosa de rio
Massa específica	3,63 g/cm³	3,04 g/cm³	2,58 g/cm³	2,61 g/cm³
Massa unitária	1,78 g/cm³	0,85 g/cm³	1,08 g/cm³	1,56 g/cm³
Teor Pulverulento	1,16%	-	-	-
Módulo de Finura	4,60	0,06	1,56	1,83
DMC	9,5 mm	1,2 mm	4,75 mm	2,4 mm

Fonte: os autores (2025).

Além da conformidade com o limite de material pulverulento (3%) para agregados miúdos (ABNT, 2021), a BSSF apresenta granulometria relativamente grosseira, enquanto o RPC exibe elevada finura. A Figura 4 fornece uma visão geral da distribuição granulométrica dos materiais.

Figura 4: Curvas granulométricas dos resíduos industriais e areia quartzosa.



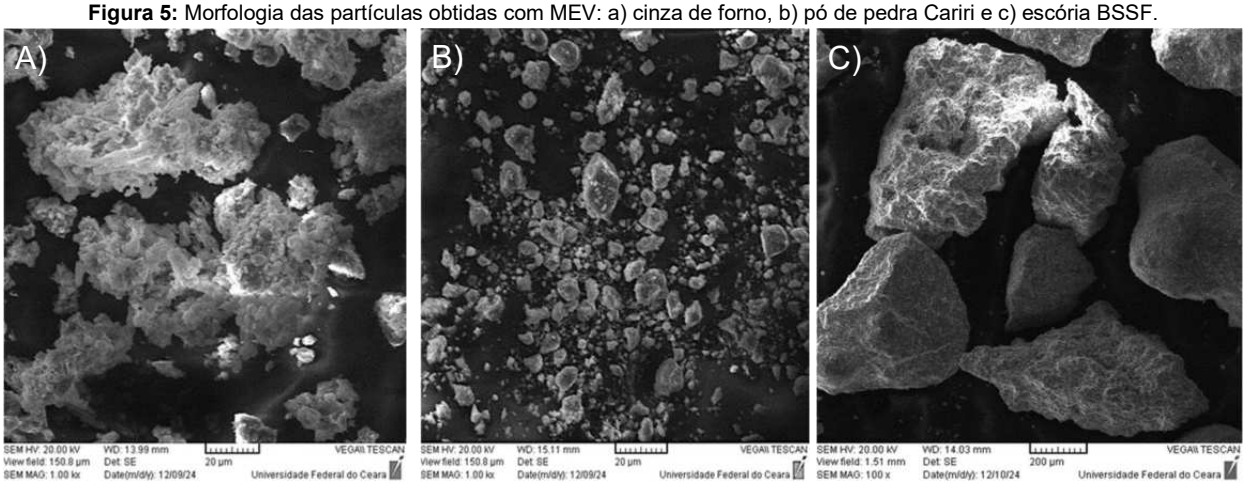
Fonte: os autores (2025).

A areia quartzosa apresenta uma distribuição granulométrica dentro da faixa especificada pela NBR 7211 (ABNT, 2022). O RPC possui um padrão semelhante, porém com maior concentração de partículas inferiores a 0,3 mm, o que pode aumentar a coesão em misturas de argamassas e concretos, melhorando sua estabilidade e reduzindo a segregação. Além disso, o RPC pode também contribuir como fíler em concretos, influenciando significativamente nas propriedades mecânicas, como evidenciado por Moura, Leite e Barros (2013).

A BSSF apresenta granulometria mais grosseira, com diâmetro máximo característico (DMC) de 9,5 mm, o que requer beneficiamento para sua compatibilização com a distribuição granulométrica da areia quartzosa de rio. Por outro lado, as cinzas predominam por partículas finas, o que permite sua utilização como substituto parcial do ligante em diversas proporções, mantendo o desempenho mínimo exigido para matrizes cimentícias, conforme Oliveira *et al.* (2021). A finura das CF é particularmente relevante para o desempenho do material, contribuindo para a melhoria das propriedades térmicas e acústicas, como demonstrado por Lacoste *et al.* (2018) em compósitos eco-isolantes.

A caracterização morfológica da BSSF evidencia que suas partículas possuem uma morfologia angular, característica comum de materiais resultantes de processos de resfriamento rápido e fragmentação mecânica (Figura 5c). É possível observar que as partículas da CF apresentam uma morfologia sem formas geométricas definidas, e estão dispostas de maneira desordenada (Figura 5a). Em contraste, as partículas do RPC exibem formato lamelar (Figura 5b), devido à estruturação geológica da rocha-mãe, formada por deposição sedimentar, como evidenciado por Menezes *et al.* (2010).

Figura 5: Morfologia das partículas obtidas com MEV: a) cinza de forno, b) pó de pedra Cariri e c) escória BSSF.



Fonte: os autores (2025).

4 CONCLUSÃO

A destinação correta e sustentável dos rejeitos gerados no estado do Ceará é viável, desde que suas características sejam devidamente analisadas, como apresentado na pesquisa. A escória BSSF, após beneficiamento, pode ser empregada como agregado miúdo, enquanto o RPC, pela análise granulométrica, pode contribuir para a coesão ao substituir esse mesmo componente. Além de possui massa específica e unitária semelhantes ao material convencional. Já a cinza têxtil tem potencial para substituir parcialmente o ligante, aprimorando as propriedades das matrizes cimentícias, desde que sejam avaliados fatores como sua composição mineralógica, morfologia e reatividade. Dessa forma, o reaproveitamento desses materiais não apenas minimiza a geração de resíduos, mas também possibilita o desenvolvimento de soluções construtivas mais ecológicas, economicamente viáveis e alinhadas às crescentes exigências por sustentabilidade no setor.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do projeto e ao suporte dos laboratórios da UFC, campus Russas, cuja infraestrutura e equipe foram fundamentais para o sucesso da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054.** Agregados - Determinação da Composição Granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

__ **ABNT NBR 16916.** Agregado miúdo – Determinação da densidade e absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

__ **ABNT NBR 16972.** Agregados – Determinação de massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

__ **ABNT NBR 16973**. Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

__ **ABNT NBR 7251.** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ANTUNES, A.; COSTA, H.; CARMO, R.; JÚLIO, E. Mortars produced with recycled aggregates from construction and demolition waste – Analysis and construction site application. **Construction and Building Materials**, v. 457, dez. de 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139395.

BRIGA-SA, A.; GAIBOR, N.; MAGALHÃES, L.; PINTO, T.; LEITÃO, D. Thermal performance characterization of cement-based lightweight blocks incorporating textile waste. **Construction and Building Materials**, v. 321, 2022. Acesso em 24 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126330

CHEN, L.; YANG, *et al.* Conversion of waste into sustainable construction materials: A review of recent developments and prospects. **Materials Today Sustainability**, v. 27, 100930. Acesso em 24 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100930

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html>. Acesso em: 12 fev. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. IPECE. **IpeceData**. Fortaleza: IPECE, 2022. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/>. Acesso em: 27 jan. 2025.

JIN, W.; HE, *et al.* Study on the mechanical properties of fly ash cement mortar reinforced with alkali-treated sisal fiber and sodium sulfate. **Industrial Crops and Products**, v. 224, 120375, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669024023525>. Acesso em 23 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120375

LACOSTE, C.; EL HAGE, *et al.* Sodium alginate adhesives as binders in wood fibers/textile waste fibers biocomposites for building insulation. **Carbohydrate Polymers**, v. 184, p. 1-8, 2018. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861717314248 >. Acesso em 22 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.12.019

MENDES, J. C.; BARRETO, *et al.* Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars. **Construction and Building Materials**, 237, 117597, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819330491#:~:text=The%20results%20demonstrate%20that%20the,content%20(free%20and%20adsorbed)>. Acesso em: 22 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117597

MENEZES, R.; MELO, *et al.* Reciclagem Do Resíduo Da Serragem De Calcário Laminado Para Produção De Blocos Cerâmicos. **Rem: Revista Escola De Minas**, v. 63, n. 4, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/NzcjFdCXnH8BfL5Bv6xJT7S/>. Acesso em 24 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000400011.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. Avaliação do uso de eliminação de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos casualmente. **Ambiente Construído**, 13 (1), 2013. Disponível em: < https://www.scielo.br/j/ac/a/tMCtTXBXcdFs84b9q4sY8gQ/>. Acesso em 25 de mar. 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100002

OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, *et al.* Study of the Incorporation of Fabric Shavings from the Clothing Industry in Coating Mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123730, 2021. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620337756>. Acesso em 23 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123730

PEREIRA, N.; ALVAREZ, *et al.* Mechanical, microstructural and electrical characterization of Portland cement mortars with foundry slags as sand replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 100, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225000221>. Acesso em 23 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111786

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. SEMA-CE. **Ceará foca na coleta seletiva para reduzir quantidade de resíduos sem reaproveitamento**. 2021. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/2021/10/11/ceara-foca-na-coleta-seletiva-para-reduzir-quantidade-de-residuos-sem-reaproveitamento/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

TANG, W.; SAJJAD, U.; ONAIZI, A.; AMRAN, M. Utilization of carbonated steel slag as fine sand in OPC concrete and mortar. **Results in Engineering**, v. 25, 103716, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024019595>. Acesso em 25 jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103716

TREZZA, M.A; SCIAN, A. N. Waste with chrome in the Portland cement clinker production. **Journal of Hazardous Materials**, v. 147, pp. 188-196, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940700009X>. Acesso em 12 de mar. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.082.

WANG, X.; SUL, A.; FARNSWHORT, C.; HASHIMOTO, B. From three-pillars to three-environments: Shifting the paradigm of sustainability in civil and construction engineering. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 20, 100748, 2024. Disponível em: < https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790824000284>. Acesso em 25 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100748.

XUE, P.; XU, *et al.* Research on the sintering process and characteristics of belite sulphoaluminate cement produced by BOF slag, **Construction and Building Materials**, vol. 122, pp. 567-676, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816310261>. Acesso em 25 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.098

ZAMORA-CASTRO, S.; SALGADO-ESTRADA, *et al.* Sustainable Development of Concrete through Aggregates and Innovative Materials: A Review. **Appl. Sci.**, v. 11(2), 629. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/629>. Acesso em 25 de jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/app11020629