



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

EMMILY EDIVIGES FERREIRA BARROS

**AVALIAÇÃO DE UM COMPÓSITO CIMENTÍCIO PIEZORESISTIVO COM
RESÍDUOS SIDERÚRGICOS**

RUSSAS
2026

EMMILY EDIVIGES FERREIRA BARROS

AVALIAÇÃO DE UM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PIEZORESISTIVO COM
RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil. Linha de Pesquisa: Materiais Avançados, Construção e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^{ta}. Dr^a. Laís Cristina Barbosa Costa.

EMMILY EDIVIGES FERREIRA BARROS

AVALIAÇÃO DE UM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PIEZORESISTIVO COM
RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil. Linha de Pesquisa: Materiais Avançados, Construção e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Laís Cristina Barbosa Costa.

Aprovada em 24/05/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Laís Cristina Barbosa Costa (ORIENTADORA)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jerfson Moura Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Maria Franco de Carvalho
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Dedico este trabalho a Nossa Senhora, que segurou minha mão tantas vezes quanto foram necessárias. Aos meus pais, que, mesmo sem entender, sempre me apoiaram; aos meus irmãos, ao meu noivo e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, dono e possibilitador de todas as coisas, por ter me permitido sonhar, mesmo quando eu não acreditava. Juntamente a Ele, à Nossa Senhora, santa da qual sou devota e a quem serei grata por toda a minha vida, em todas as suas formas e representações.

À minha família, principalmente aos meus pais, pois, mesmo sem entenderem a importância ou o que significa ser mestre, nunca questionaram nem me deixaram voltar atrás. Aos meus irmãos, em especial às minhas irmãs, Emmannuely e Manuela, que enxergam em mim mais do que até mesmo eu posso ser. Ao meu noivo, Samuel, sempre tão preocupado se lembrei de me alimentar, de dormir e se estou bem.

À minha orientadora, Laís Costa, por todo o tempo dedicado a mim, mesmo, às vezes, sem poder, por ter me acolhido no meio do caminho e caminhado comigo até aqui.

Aos meus colegas e amigos do mestrado, exemplos de profissionais e, mais ainda, de amigos, em especial Allan Magalhães, Antônio José, Arthur Allisson, Carlos Eduardo, Elói Romão, Gilmar Costa e Ryan Araújo — a vida sempre será mais leve com vocês.

Aos meus companheiros de laboratório, Magna, Mateus e Rogério, que também são amigos que conquistei nessa jornada.

Aos professores do programa, sem exceção. Aos meus professores da graduação, que hoje são amigos e que me ajudaram nessa caminhada, Joseneto de Souza e Letícia Moreira; em especial, à professora Jeane Souza, por quem tenho um apreço muito especial e que sempre torceu por mim. Aos amigos da Engenharia de Mecânica, pelas boas risadas e pelos ensinamentos técnicos, assim como aos meus amigos Rafael, Raylson, Nayara e Moab, que sempre torceram por mim. À secretária do programa de mestrado, Milena, por toda a atenção e torcida. Aos técnicos de laboratório do campus Russas e do campus do Pici, em especial Myckelle Ferreira e Alisson Guilherme.

À banca avaliadora, por todos os ensinamentos que contribuíram não somente com este trabalho, mas também com a profissional que me tornei.

Por último, às agências de fomento — Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bem como à infraestrutura e colaboração da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Por cada contribuição, o meu muito obrigada. Tudo isso só foi possível graças a cada um de vocês.

“Somos o resultado dos livros que lemos, das viagens que fazemos e das pessoas que amamos.”

Airton Ortiz

RESUMO

O monitoramento da integridade estrutural (MIE) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a prevenção de falhas em estruturas civis, especialmente diante de eventos recentes de colapsos estruturais que evidenciam a necessidade de soluções mais eficientes e contínuas de acompanhamento do desempenho estrutural. Nesse contexto, compósitos cimentícios autossensoriais, baseados no efeito piezoresistivo, surgem como uma alternativa promissora aos sistemas convencionais de monitoramento, os quais apresentam limitações relacionadas à durabilidade, custo e integração com materiais cimentícios. Contudo, a maioria dessas soluções ainda depende do uso de materiais condutivos à base de carbono, cuja aplicação é limitada pelo alto custo e pela complexidade de dispersão na matriz. Diante disso, este trabalho avalia o potencial de resíduos siderúrgicos — escória de aciaria de Forno Básico de Oxigênio (BOF) e pó de dessulfuração por Reator Kambara (KR) — como agregados condutivos em compósitos cimentícios autossensoriais. As escórias foram obtidas de uma siderurgia localizada no Porto do Pecém (CE) e submetidas a processos de beneficiamento, incluindo adequação granulométrica e estabilização volumétrica por intemperização acelerada, no caso da escória BOF. Foram produzidas três composições de argamassas, sendo uma de referência e duas com substituição total do agregado miúdo por resíduos siderúrgicos, utilizando traço 1:3 e relação água/cimento de 0,55. As argamassas foram caracterizadas quanto às propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, por meio de ensaios de absorção de água, índice de vazios, resistência mecânica, velocidade de pulso ultrassônico e microscopia eletrônica de varredura. A avaliação elétrica e piezoresistiva foi realizada utilizando a técnica de quatro sondas, com monitoramento da corrente elétrica em corpos de prova submetidos a ciclos de carregamento. Os resultados indicaram que a incorporação dos resíduos siderúrgicos alterou significativamente o comportamento elétrico dos compósitos. A argamassa contendo sucata KR apresentou os menores valores de resistividade elétrica e a maior sensibilidade piezoresistiva, evidenciando elevada capacidade de resposta às variações de carga, embora tenha apresentado desempenho mecânico inferior. Por outro lado, a escória BOF demonstrou comportamento mais equilibrado, com desempenho mecânico satisfatório e resposta elétrica consistente, configurando-se como uma alternativa promissora para aplicações em sensores estruturais integrados. Dessa forma, os resultados demonstram que resíduos siderúrgicos podem atuar como fases funcionais ativas em compósitos cimentícios autossensoriais, contribuindo não apenas para o desenvolvimento de materiais inteligentes, mas também para a valorização de subprodutos industriais. A utilização desses resíduos promove a redução do consumo de

materiais convencionais, reforça estratégias de economia circular e amplia o potencial de aplicação de compósitos cimentícios no monitoramento estrutural.

Palavras-chaves: monitoramento estrutural; autossensoriamento; matriz cimentícia; piezoresistividade; resíduos siderúrgicos; sustentabilidade.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) has become an essential tool for preventing failures in civil structures, particularly in light of recent structural collapses that highlight the need for more efficient and continuous performance monitoring solutions. In this context, self-sensing cementitious composites based on the piezoresistive effect have emerged as a promising alternative to conventional monitoring systems, which present limitations related to durability, cost, and integration with cement-based materials. However, most of these solutions still rely on carbon-based conductive materials, whose application is limited by high cost and the complexity of dispersion within the cementitious matrix. In this regard, this study evaluates the potential of steelmaking by-products—Basic Oxygen Furnace (BOF) slag and Kambara Reactor (KR) desulfurization powder—as conductive aggregates in self-sensing cementitious composites. The materials were obtained from a steel plant located at the Pecém Port Industrial Complex (CE, Brazil) and subjected to processing procedures, including particle size adjustment and volumetric stabilization through accelerated weathering for BOF slag. Three mortar mixtures were produced: a reference mixture and two others with total replacement of conventional fine aggregate by steelmaking residues, using a 1:3 mix proportion and a water-to-cement ratio of 0.55. The mortars were characterized in terms of physical, mechanical, and microstructural properties through water absorption, void index, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, and scanning electron microscopy. The electrical and piezoresistive behavior was evaluated using the four-probe method, with current monitoring in specimens subjected to cyclic loading. The results showed that the incorporation of steelmaking residues significantly influenced the electrical behavior of the composites. The mixture containing KR slag exhibited the lowest electrical resistivity and the highest piezoresistive sensitivity, demonstrating a strong ability to respond to applied loading, although it presented lower mechanical performance. In contrast, the BOF slag mixture showed a more balanced behavior, combining satisfactory mechanical performance with a consistent electrical response, indicating its potential for application in integrated structural sensing systems. Therefore, the findings demonstrate that steelmaking residues can act as active functional phases in self-sensing cementitious composites, contributing not only to the development of smart materials but also to the valorization of industrial by-products. Their incorporation promotes the reduction of conventional material consumption, supports circular economy strategies, and expands the applicability of cementitious composites in structural health monitoring.

Keywords: structural health monitoring; self-sensing; cement matrix; piezoresistivity; steelmaking residues; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração dos resíduos siderúrgicos.....	25
Figura 2 - Fluxograma experimental.	29
Figura 3 – Resíduos siderúrgicos utilizados: (a) Escória BOF (b) Pó de dessulfuração KR. ..	30
Figura 4 - Amostra ensaios resistivos e piezoresistivos.	34
Figura 5 - <i>Setup</i> Experimental.	35
Figura 6 - Curva TG da Escória BOF e KR.	38
Figura 7 - Curva granulométrica dos resíduos.....	40
Figura 8 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das argamassas.	41
Figura 9 - Absorção de água e índice de vazios.	43
Figura 10 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU).	44
Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão.	46
Figura 12 - Resistividade das argamassas.	49
Figura 13 - Resultado do ensaio piezoresistivo.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicações dos resíduos siderúrgicos.....	27
Tabela 2 - Distribuição granulométrica da areia normal	31
Tabela 3 - Teor de aditivo das argamassas.....	32
Tabela 4 - Ensaio de caracterização das argamassas autossensoriais.....	32
Tabela 5 - Resultado da Fluorescência de Raio -X.	36
Tabela 6 - Caracterização físicas dos resíduos siderúrgicos e da areia.	39

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOF	Forno Básico de Oxigênio
CB	Negro Fumo
CCA	Compósitos Cimentícios Autossensoriais
CNF	Nanofibras de Carbono
CNTs	Nanotubos de Carbono
DTG	Derivada Termogravimétrica
EAF	Escória de Forno à Arco Elétrico
FRX	Fluorescência de Raios-X
IABr	Instituto Aço Brasil
KR	Pó de Dessulfuração por Reator Kambara
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MIE	Monitoramento da Integridade Estrutural
MWCNT	Nanotubo de Carbono com Paredes Múltiplas
NBR	Norma Brasileira Reguladora
SHM	Structural Health Monitoring
TG	Termogravimetria
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1 Monitoramento Estrutural na Engenharia Civil.....	20
3.2. Materiais de Autossensoriamento	22
3.3. Resíduos Siderúrgicos	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Materiais.....	29
4.2 Caracterização e Beneficiamento dos Materiais.....	30
4.3 Produção das Argamassas Autossensoriais.....	32
4.4 Caracterização Física das Argamassas Autossensoriais	32
4.5 Avaliação da Capacidade Piezoresistiva das Argamassas Autossensoriais	33
5 RESULTADOS	36
5.1 Caracterização Química dos Resíduos Siderúrgicos.....	36
5.2 Caracterização Física dos Materiais	39
5.3 Caracterização Física das Argamassas Produzidas	40
5.4 Análise da Capacidade Piezoresistiva.....	48
6 CONCLUSÕES.....	53
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Acidentes estruturais representam um problema recorrente em escala global, resultando em perdas humanas, impactos econômicos significativos e comprometimento da confiança na segurança das edificações. Estima-se que falhas estruturais e deficiências em manutenção e inspeção estejam entre as principais causas de colapsos em infraestruturas ao redor do mundo, frequentemente associadas à degradação progressiva dos materiais e à ausência de monitoramento adequado ao longo da vida útil.

Eventos de grande repercussão internacional, como o colapso da Ponte Morandi (2018 – Itália), a queda do Condomínio Champlain Towers South (2021 – Estados Unidos da América) e o desabamento do Edifício Rana Plaza (2013 – Bangladesh), ilustram a magnitude dessas ocorrências. No Brasil, episódios semelhantes também têm sido registrados, como os colapsos do Edifício Liberdade (2012 – Rio de Janeiro), do Edifício Gran Parc (2016 – Espírito Santo) e do Edifício Andrea (2019 – Ceará).

Esses eventos resultaram em perdas humanas, danos materiais expressivos e responsabilizações técnicas. Segundo Ribeiro e Santos (2020), os casos nacionais mencionados ocasionaram, respectivamente, 17 mortes e custos estimados em 10 milhões de reais; 1 morte, 4 feridos e cerca de 130 milhões de reais em custos de reconstrução e indenizações; e 9 mortes, 7 feridos, além de aproximadamente 2 milhões de reais em indenizações e responsabilização do engenheiro por homicídio culposo. Para diversos outros desastres, no entanto, não há dados consolidados sobre os prejuízos associados.

Nesse contexto, destaca-se que a ocorrência desses eventos está frequentemente relacionada à ausência ou à insuficiência de monitoramento estrutural ao longo da vida útil das edificações, evidenciando a necessidade de desenvolvimento e aplicação de técnicas mais eficientes de acompanhamento do desempenho estrutural.

O Monitoramento da Integridade Estrutural (MIE) surge como uma ferramenta essencial para mitigar os riscos associados a problemas de integridade estrutural e monitorar as estruturas ao longo do tempo (Xu *et al.*, 2019). Esses sistemas são cruciais para a prevenção de falhas estruturais (Le *et al.*, 2023). Entre os materiais que mais vêm sendo explorados nesse tipo de aplicações, destacam-se as matrizes cimentícias, polímeros condutores, nanocompósitos à base de carbono, metais com memória de forma e materiais cerâmicos.

Entre os princípios fundamentais desses materiais está a piezoresistividade, que se refere às mudanças na resistividade elétrica do material induzidas por estímulos mecânicos (Lim, Jin e Bae, 2020). Estudos recentes (Yao *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025; Khalid *et al.*,

2025) destacaram as vantagens do monitoramento baseado no comportamento piezoresistivo e autossensoriamento, como a precisão para detectar deformações mecânicas com capacidades aprimoradas de transferência de sinal, construção de rede condutiva multinível, melhoria do efeito de tunelamento e maior sensibilidade no monitoramento de pressões internas.

Nesse cenário, destaca-se a importância do monitoramento estrutural em elementos de concreto, o segundo material mais utilizado no mundo, tendo em vista sua suscetibilidade à degradação ao longo do tempo, decorrente da ação de agentes agressivos, da insuficiência de manutenção e da complexidade das interações entre seus constituintes e o ambiente de serviço (Jiang et al., 2024). Nesse sentido, a prevenção de colapsos estruturais tem motivado o desenvolvimento de soluções inovadoras para monitoramento e manutenção de estruturas.

Entre os avanços no campo dos autossensores, destaca-se o compósito de cimento auto sensível, projetado para monitorar o desempenho de estruturas de concreto (Yin *et al.*, 2020). Esse material é definido como uma combinação de uma matriz não condutiva integrada a um material condutor, proporcionando durabilidade e compatibilidade com estruturas existentes (Fang, Li, Jang, 2020; Sánchez e Sobolev, 2010).

Com relação aos materiais mais utilizados na fabricação de compósitos com capacidade de autossensoriamento, uma das abordagens mais recorrentes consiste no uso de nanotubos de carbono (Wang, Deng, Yang, 2024; Deng *et al.*, 2024) ou fibras de aço (Li *et al.*, 2025; Elseady *et al.*, 2025) na matriz condutora. No entanto, a aplicação desses materiais apresenta limitações relevantes, sobretudo associadas ao elevado custo de incorporação e à necessidade de um rigoroso controle do processo de dispersão na matriz cimentícia. A dispersão adequada é um fator crítico, uma vez que a formação de uma rede condutiva eficiente depende da distribuição homogênea dos elementos condutores e do estabelecimento de caminhos percolantes contínuos. A ocorrência de aglomerações, comum especialmente em materiais nanoestruturados como os nanotubos de carbono devido às forças de van der Waals, prejudica a conectividade elétrica e resulta em comportamento piezoresistivo instável ou até inexistente. Além disso, falhas na interface entre a fase condutiva e a matriz cimentícia comprometem a transferência de cargas e a sensibilidade do compósito. Conforme destacado por Li *et al.* (2021), a dispersão inadequada aliada à baixa resistência de ligação pode levar à perda significativa das propriedades funcionais do material. Esses fatores tornam a técnica mais complexa do ponto de vista tecnológico e menos viável economicamente.

Uma alternativa aos materiais condutores convencionais é a incorporação de resíduos com alto teor de partes condutoras elétricas. Nesse sentido, destaca-se os resíduos siderúrgicos

que devido ao seu processo de geração possuem composição química rica em ferro (Liu *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2021), alumínio (Saxena e Tembhurkar, 2018; Sun *et al.*, 2021) e outros metais. Outro ponto que pode ser ressaltado é o de Lee, Le e Kim, (2019), que relataram que a escória de aciaria e as fibras de aço seriam facilmente dispersas e Le *et al.*, (2024) que o material foi essencial para o controle e detecção de fissuras. As escórias siderúrgicas são amplamente utilizadas na construção civil (Sarkar e Hegde, 2025; Kurniati e Pederson, 2023; Carvalho *et al.*, 2023), devido à sua viabilidade e disponibilidade. Estudos anteriores utilizaram escórias para diversas aplicações, como agregado em matrizes convencionais (Sezer e Gülderen, 2015) e em concreto autoadensável (Santamaria *et al.*, 2020), além de estudos focados na sua incorporação para aprimoramento da resistência do concreto (Dinesh, Indhumathi e Pichumani, 2024; Papachristoforou, Anastasiou e Papayianni, 2020). Porém, não como elemento principal em sensores para monitoramento estrutural. No entanto, existem estudos como de Costa *et al.*, (2024) que notaram a diminuição da resistividade elétrica do concreto quando escórias de aciaria são utilizadas.

A utilização da escória de aciaria como material autossensor não representa apenas a incorporação de uma nova funcionalidade tecnológica aos compósitos cimentícios, mas também configura uma estratégia alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular. Trata-se de um resíduo de elevada geração na indústria siderúrgica, cuja destinação final ainda é limitada e, em muitos casos, restrita a aplicações de baixo valor agregado ou à disposição em aterros. Nesse contexto, sua incorporação em matrizes cimentícias com função sensorial promove a valorização de um subproduto industrial, reduzindo impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos e à extração de matérias-primas naturais.

Diferentemente das abordagens convencionais, nas quais a escória é empregada predominantemente como material cimentício suplementar ou agregado, com contribuição essencialmente mecânica ou como filler, sua aplicação em compósitos autossensores representa um avanço significativo em termos de agregação de valor tecnológico. Nesse caso, o material passa a desempenhar um papel ativo no monitoramento estrutural, contribuindo para a detecção de danos e variações de carregamento por meio de propriedades elétricas, o que amplia significativamente seu potencial de aplicação.

Além disso, a substituição parcial de materiais tradicionais por resíduos industriais pode contribuir para a redução da pegada de carbono da construção civil, especialmente ao diminuir a demanda por cimento Portland, cuja produção é intensiva em emissões de CO₂ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Segundo Provis, (2018) e (Shi, Qian,

2000), a utilização de escórias na construção civil apresenta benefícios ambientais expressivos, incluindo a redução do consumo de recursos naturais e a mitigação de impactos associados à disposição inadequada desses resíduos. Ademais, conforme destacado pela World Steel Association, (2023), a valorização de coprodutos siderúrgicos é uma estratégia essencial para a transição da indústria rumo a modelos produtivos mais sustentáveis.

Diante desse cenário, o presente trabalho busca incorporar as escórias de Forno Básico de Oxigênio (BOF) e pó de dessulfuração por Reator Kambara (KR) como agregados condutivos em compósitos cimentícios para monitoramento estrutural. Ao utilizar esses resíduos siderúrgicos como materiais condutores, pretende-se desenvolver compósitos de alto desempenho capazes de detectar deformações estruturais através do monitoramento da corrente elétrica. Assim, este estudo contribui para a avaliação do potencial piezoresistivo dos materiais e promove o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um compósito cimentício autossensorial com potencial piezoresistivo utilizando resíduos siderúrgicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar se a incorporação de resíduos siderúrgicos confere comportamento piezoresistivo aos compósitos cimentícios sob carregamento cíclico;
- Verificar de que forma a incorporação desses resíduos influencia as propriedades mecânicas do material;
- Correlacionar a composição química dos resíduos com a resistividade elétrica dos compósitos cimentícios, visando sua aplicação em monitoramento estrutural.
- Desenvolver um sistema experimental (*setup*) para a realização de ensaios piezoresistivos em compósitos cimentícios, integrando circuito elétrico e máquina universal de ensaios.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Monitoramento Estrutural na Engenharia Civil

Avaliar e monitorar com precisão a condição das estruturas é essencial para garantir a segurança e a integridade da infraestrutura civil (Gwon e Jung, 2025). Em estruturas sujeitas a cargas estáticas ou cíclicas excessivas, fissuras podem se desenvolver e se propagar, levando a falhas estruturais, especialmente em materiais fracos em tração, como o concreto (Fan *et al.*, 2018). Essas falhas podem comprometer não apenas a segurança dos usuários, mas também gerar custos significativos de manutenção e reparação (Giordano, Quqa e Limongelli, 2023).

Tradicionalmente, as inspeções visuais são amplamente utilizadas para detectar danos estruturais. No entanto, sua eficácia é limitada, pois muitas vezes restringem-se à detecção de danos superficiais, não revelando fissuras internas ou o real impacto na estrutura. Métodos avançados, como emissão acústica e sensores de deformação embutidos, surgiram para superar essas limitações, permitindo uma detecção mais aprofundada de danos internos (Davis, Mirsyar e Hartl, 2021).

Com o objetivo de mitigar esses problemas, o monitoramento da integridade estrutural, conhecido como SHM em inglês e MIE em português, foi desenvolvido. O MIE é um sistema que avalia o desempenho e a segurança de estruturas através do monitoramento continuamente ao longo de sua vida útil (He *et al.*, 2022). Um dos aspectos mais promissores do MIE é o monitoramento dinâmico, que se refere ao monitoramento de sistemas com diferentes mudanças de carga. O monitoramento constante das estruturas pode detectar danos por meio de alguns parâmetros locais e gerais que se desviam das condições normais, o que leva à garantia da segurança do objeto (Ma *et al.*, 2024). Esses sistemas podem detectar danos como rachaduras, delaminação ou corrosão e ajudar a prever a manutenção, maximizando a disponibilidade e a segurança dos ativos (Khalid, 2025). Essas técnicas são especialmente úteis na identificação de fissuras em estágios iniciais, antes que comprometam significativamente a integridade estrutural (Fan e Quião, 2011). Estudos recentes destacam que essas tecnologias não apenas aumentam a precisão na detecção de danos, mas também reduzem custos operacionais a longo prazo, tornando-se uma ferramenta amplamente adotada na engenharia, devido à sua capacidade de aumentar a segurança, melhorar os planos de manutenção e estender a vida útil das estruturas (Zhang *et al.*, 2020; Masciotta, Ramos e Lourenço, 2017).

Os sensores desempenham um papel fundamental nos sistemas de monitoramento ao coletar e transmitir sinais de monitoramento relevantes (Shen *et al.*, 2025). Dentre os sensores

mais utilizados, destacam-se os extensômetros elétricos (*strain gauges*), que medem deformações mecânicas nas estruturas e são amplamente aplicados na análise da integridade estrutural de materiais compostos (Silva *et al.*, 2018). Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência elétrica de um fio ou grade metálica fixada ao dispositivo ao sofrer uma deformação juntamente com o material analisado. Essa variação de resistência é captada por uma placa de aquisição de dados, que interpreta os sinais elétricos e os converte em valores de deformação. No entanto, esse método é limitado devido à instalação complexa e baixa durabilidade. (Dong *et al.*, 2019). Os acelerômetros são sensores que medem a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo. Por sua vez, são empregados na identificação de vibrações e impactos estruturais, sendo utilizados em estudos para prever falhas em estruturas de concreto armado (Santos *et al.*, 2019).

Sensores de fibra óptica funcionam com base na transmissão de luz por meio de fibras extremamente finas feitas de vidro ou plástico (Bhati, *et al.* 2001). Essas fibras sofrem alterações em suas propriedades ópticas quando submetidas a estímulos físicos, como deformações ou variações de temperatura, que são detectadas e convertidas em sinais mensuráveis. Sensores de fibra óptica apresentam alta sensibilidade e resistência a ambientes agressivos, sendo aplicados no monitoramento contínuo de pontes e edifícios sujeitos a variações térmicas e mecânicas (Oliveira *et al.*, 2020). Sensores de resistência elétrica e condutividade também são empregados para acompanhar processos corrosivos em estruturas, como observado em estudos sobre degradação de armaduras em concreto expostas a ambientes agressivos (Costa *et al.*, 2017). Além desses sensores tradicionais, nas últimas décadas, diversos métodos inovadores de monitoramento da integridade estrutural foram desenvolvidos, incluindo cerâmicas piezoelétricas e compósitos cimentícios autossensoriais (Yang *et al.*, 2023). Essas tecnologias, quando integradas a sistemas de monitoramento, possibilitam a avaliação contínua da estabilidade estrutural, contribuindo para a manutenção preventiva e aumentando a vida útil das construções.

Apesar dos avanços associados à adoção de técnicas instrumentadas, o uso de sensores de deformação ainda apresenta limitações que podem comprometer sua aplicação em condições reais de monitoramento. Entre os principais desafios, destaca-se a sensibilidade desses dispositivos a fatores ambientais, como variações de temperatura e umidade, que podem influenciar a resposta dos sensores e introduzir desvios nas medições não relacionados diretamente ao comportamento estrutural (Kang *et al.*, 2025). Além disso, a necessidade de uma elevada densidade de sensores para obtenção de um diagnóstico mais representativo da estrutura

implica aumento dos custos de instalação, operação e manutenção, o que pode dificultar sua aplicação em larga escala (Mardanshahi *et al.*, 2025). Soma-se a isso a presença de ruídos e interferências nos sinais adquiridos, exigindo o uso de técnicas de processamento mais robustas para garantir a confiabilidade dos dados. No caso de sensores baseados em princípios piezoresistivos e em fibra óptica, também são reportadas limitações relacionadas à durabilidade, estabilidade a longo prazo e à necessidade de calibração periódica, fatores que influenciam diretamente a precisão das medições ao longo do tempo (Yassin e Farhat, 2024; Gao *et al.*, 2022). Dessa forma, embora representem uma alternativa promissora às técnicas tradicionais, esses sistemas ainda demandam aprimoramentos para assegurar maior robustez, precisão e viabilidade em aplicações práticas de monitoramento estrutural.

Nesse contexto, destaca-se o crescente interesse pelo desenvolvimento de materiais cimentícios autossensores como alternativa aos sensores convencionais, em especial por meio da incorporação de resíduos industriais com potencial condutivo, como as escórias siderúrgicas. Embora esses materiais ainda não sejam empregados de forma plenamente consolidada como sensores de deformação, estudos recentes indicam que sua utilização pode promover melhorias significativas na condutividade elétrica dos compósitos, favorecendo a formação de redes condutivas internas, diminuindo a resistência e aumentando o aprimoramento da resposta piezoresistiva (Wang e Aslani, 2023; Rojas *et al.*, 2025; Menéndez *et al.*, 2022).

3.2. Materiais de Autossensoriamento

Segundo, Dinesh, Suji e Pichumani (2023) e Mu *et al.*, (2018), os sensores tradicionais possuem diversas limitações como o alto custo, baixa sensibilidade e falta de escalabilidade. Para superar essas desvantagens têm sido desenvolvidas Compósitos Cimentícios Autossensoriais (CCA) compostos por partículas condutoras incorporados nas matrizes cimentícias para através do efeito piezoresistivo detectar tensões indesejadas que possam causar deformações na matriz (Dong *et al.*, 2019). Segundo Seo *et al.* (2022), essa característica é uma das principais vantagens desses sensores, pois sua incorporação ao sistema estrutural garante maior eficiência operacional.

Em função dessas características, esses dispositivos são amplamente empregados no monitoramento do comportamento estrutural por meio da medição da resistividade ou condutividade elétrica (Dinesh, Indhumathi e Pichumani, 2024). Além disso, como um benefício adicional, destaca-se a maior compatibilidade com o material base, o que favorece a adesão e o adequado funcionamento do sistema (Liu *et al.*, 2018), permitindo,

consequentemente, maior precisão na análise da propagação de danos e na avaliação de sua severidade (Kang *et al.*, 2024).

Os compósitos são materiais que apresentam múltiplas fases e possuem uma estrutura heterogênea em diferentes escalas, tanto microscópica quanto macroscópica (Mano, 2000). Com a promoção do autossensoriamento, a pesquisa dos CCA se aprofundou gradualmente (Zhao e Qiang, 2025). Uma das principais vantagens de um sistema MIE é a detecção em tempo real, dinâmica e consecutiva em resposta a estímulos externos (Song, Li, Xu 2024). Essas características os tornam ideais para aplicações em estruturas com alta sollicitação estrutural, como pontes e edifícios, permitindo a detecção precoce de falhas, a prevenção de desastres e a otimização de custos de manutenção (Han *et al.*, 2024).

Os compósitos cimentícios autossensoriais podem ser produzidos pela incorporação de Nanotubos de Carbono (CNTs) (Suchorzewski, Prieto, Mueller, 2020), Nanotubos de Carbono com Paredes Múltiplas (MWCNTs) (Woo *et al.*, 2025; Khan *et al.*, 2024), fibras de carbono (Ghadhban, Joni, Al-dahawi, 2021), grafeno (Prudente *et al.*, 2024; Gholami *et al.*, 2024), nanofibras de grafite (Xu *et al.*, 2024), pó de grafite (Lee *et al.* 2022), níquel (Piao *et al.*, 2024; Chu, 2023), Negro Fumo (CB) (Guo *et al.*, 2022; Dinesh, 2023) e Nanofibras de Carbono (CNF) (Li *et al.*, 2024).

Dentre os materiais de utilizados como filler, a maioria das pesquisas sobre o desenvolvimento de concreto autossensorial concentrava-se anteriormente nas fibras de carbono (Chen, 1993; Wen, 2007). Porém, com o avanço da tecnologia, os nanotubos de carbono passaram a se destacar como filler (Konsta-Gdoutos e Aza, 2014; D'Alessandro *et al.*, 2016). Além do tipo de material, o nível de concentração e o tamanho das partículas de filler também afetam o comportamento de detecção. Em geral, a resistividade elétrica do concreto autossensorial diminui lentamente com o aumento da concentração do filler nas fases iniciais (Tian *et al.*, 2019).

O autor ainda destaca que, em materiais em escala nanométrica, precisam utilizar processos como sonicação e o uso de agentes dispersantes para promover uma distribuição homogênea das partículas condutoras na matriz cimentícia. A dispersão adequada é um fator crítico, uma vez que influencia diretamente a formação de redes condutivas eficientes e, consequentemente, o desempenho elétrico e sensorial dos compósitos. Estudos indicam que a tendência de aglomeração dos nanotubos, associada às forças de van der Waals, dificulta sua dispersão uniforme, comprometendo as propriedades do material quando não tratada adequadamente (Carísio *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2017).

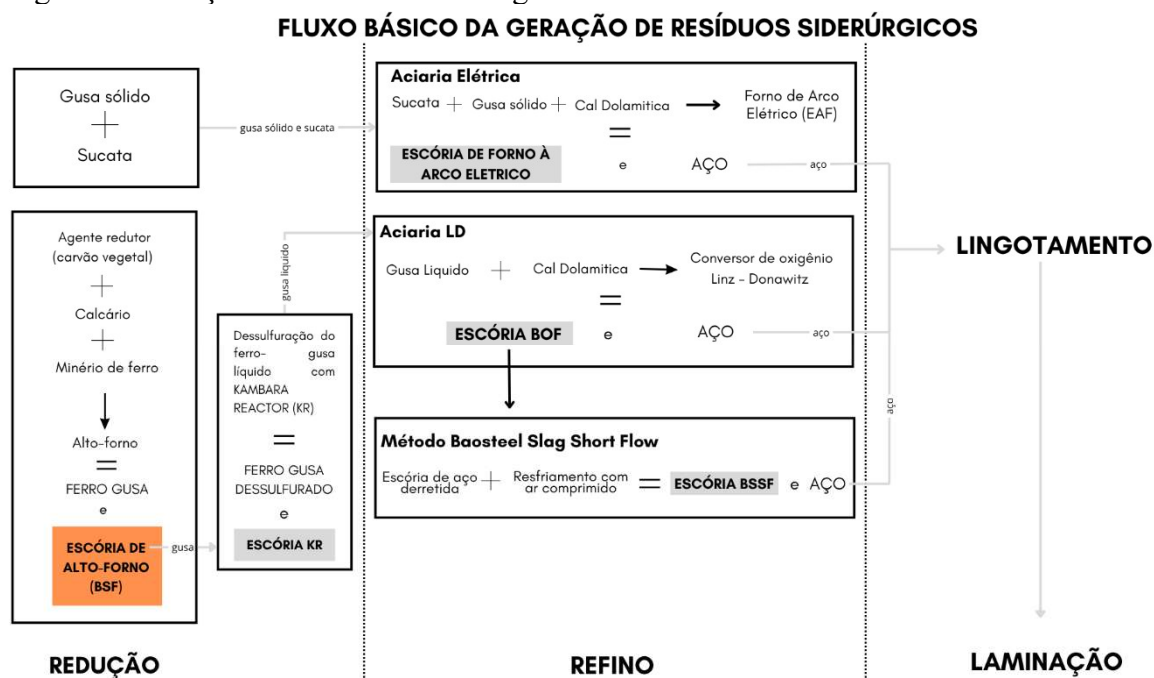
Além disso, a distribuição heterogênea das partículas pode prejudicar a formação da rede de percolação, reduzindo a condutividade elétrica e a sensibilidade piezoresistiva do compósito (Mardani *et al.*, 2022). Em situações de má dispersão, observa-se ainda a formação de aglomerados mesmo em teores mais elevados de nanomateriais, o que limita os ganhos de desempenho e pode gerar efeitos adversos nas propriedades do material (Yu *et al.*, 2025). Nesse contexto, para compensar a baixa eficiência da rede condutiva, torna-se frequentemente necessária a incorporação de maiores quantidades de nanomateriais, elevando significativamente o custo do compósito e a complexidade do seu processamento.

Adicionalmente, a necessidade de técnicas específicas de dispersão, como ultrassonicação e uso de aditivos químicos, reforça a dependência de maior controle tecnológico, dificultando a aplicação em larga escala. Dessa forma, a dispersão inadequada não apenas compromete o desempenho do autossensoriamento, mas também impacta diretamente a viabilidade econômica e a reprodutibilidade desses materiais em aplicações estruturais.

3.3. Resíduos Siderúrgicos

O Brasil é o maior produtor de aço da América Latina (ALACERO, 2024), sendo essa produção dividida em etapas como redução, refino, laminação e lingotamento, mostradas na Figura 1. Em cada etapa da indústria siderúrgica diferentes resíduos são gerados. Segundo dados da Aço Brasil cerca de 32 milhões de toneladas de aço foram fabricadas em 2023, desse quantitativo, a cada 1 tonelada de aço foram gerados 662 kg de coprodutos e resíduos (IABr, 2024). Atualmente, as duas principais rotas comerciais de fabricação de aço são a de forno de arco elétrico (rota direta) e conversor a oxigênio (rota indireta). A rota direta dispensa a etapa de redução, em que é fabricado o ferro gusa a partir do minério de ferro em alto forno. A rota produtiva mais utilizados no Brasil é a indireta, segundo o Instituto Aço Brasil (2024) correspondendo em 2023 a cerca de 75% de toda produção do aço. Quando se trata da produção global, segundo Li *et al.* (2024), essa rota produtiva concentra 73,2% de toda a produção mundial.

Figura 1 - Geração dos resíduos siderúrgicos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na saída da etapa de redução, antes do refino, o ferro gusa pode ser submetido a uma etapa de dessulfuração para eliminação das impurezas, essa etapa produz o pó de dessulfuração Kambara, comumente conhecido como sucata KR. O processo de dessulfuração envolve a remoção parcial do enxofre contido no ferro-gusa líquido por meio da adição de um agente dessulfurante (Oliveira Bridi, 2020; Pires *et al.*, 2019; Schumacher, 2018). Com isso, a composição convencional das escórias KR contém componentes químicos, como dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro III (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3) (Pires *et al.*, 2019). Durante a produção do aço, a remoção das escórias não é completamente eficiente, resultando no arraste de certa quantidade de metal líquido (Dieguez, 2018). Isso faz com que as escórias ainda apresentem grande quantidade de elementos metálicos, que são bons condutores.

Em seguida, vem o refino primário que pode acontecer no conversor a oxigênio (BOF) ou no forno elétrico a arco (EAF). No conversor a oxigênio tem-se início a purificação do aço, em que o ferro gusa se transforma em aço, ficando livre de elementos indesejáveis e gerando assim a escória do BOF (Amancio, 2019). Ambos os métodos de refino têm o objetivo de ajustar a composição químicas e remover impurezas.

Segundo Martins *et al.*, (2021) os principais constituintes da escória de aciaria são cálcio (Ca), silício (Si), ferro (Fe), alumínio (Al) e magnésio (Mg). Diversos autores (Jiang *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2018) destacam a presença de óxidos livres, como o de cálcio (CaO) e magnésio (MgO). Esses óxidos podem estar presentes na forma de óxidos livres, os

quais reagem com a água ao longo do tempo, ocasionando expansões volumétricas indesejáveis e comprometendo a estabilidade dimensional do material. Em função desse comportamento, por muitos anos a presença desses compostos foi considerada um dos principais limitadores para a aplicação da escória de aciaria em materiais cimentícios, especialmente em contextos que exigem maior durabilidade.

No entanto, com o avanço das técnicas de processamento, diferentes rotas de estabilização têm sido desenvolvidas com o objetivo de mitigar esses efeitos expansivos e viabilizar o uso seguro desse resíduo. Entre as principais estratégias, destacam-se os processos de envelhecimento, a oxidação seguida de resfriamento a ar e o tratamento químico por via ácida (Li *et al.*, 2024; Adegoloye *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2017; Goyal, Mudgal e Ghosh, 2024).

O envelhecimento, em particular, consiste na exposição controlada da escória a condições ambientais, como umidade e dióxido de carbono, por períodos prolongados, permitindo a hidratação e carbonatação dos óxidos livres. Esse processo promove a conversão de CaO e MgO em compostos mais estáveis, como hidróxidos, reduzindo significativamente o potencial de expansão tardia. O tempo de envelhecimento pode variar de semanas a meses, dependendo das condições de armazenamento e da granulometria do material, sendo um método amplamente utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo operacional.

Devido ao processo de fabricação do aço gerar diferentes resíduos em grandes quantidades existe uma busca para possíveis aplicações e potencialidades desses subprodutos. A escória de alto-forno (gerada na etapa de refino) apresenta propriedades cimentícias e é empregada como substituto parcial do clínquer na produção do cimento Portland III e no V. Segundo o Instituto Aço Brasil (2024), a escória de alto forno possui um percentual de aproveitamento de 98%. Apesar de apresentarem propriedades favoráveis, as escórias de aciaria ainda possuem menor nível de aplicação comercial quando comparadas às escórias de alto-forno, por exemplo, que são amplamente empregadas na produção do cimento CP III. Diversos estudos (Fu, Know e Lee, 2024; Martins *et al.*, 2022) utilizam e destacam o potencial de reciclagem das escórias de aciaria devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis, como elevada resistência mecânica, durabilidade, resistência à corrosão e, inclusive, a ataques por cloretos, conforme evidenciado por Costa *et al.*, (2022). A Tabela 1 apresenta, de forma mais detalhada, estudos que investigaram diferentes aplicações para as escórias aciarias e sucata KR. As siglas representam as seguintes escórias: BOF (Escória Básica de Oxigênio), EAF (Escória de Forno à Arco Elétrico), KR (Sucata KR), e BFS (Escória de Alto Forno).

Tabela 1 - Aplicações dos resíduos siderúrgicos.

Aplicação	Escória	Fonte
Agregados para concretos moldados in loco	BOF	Costa <i>et al.</i> , (2024); Costa <i>et al.</i> , (2022)
Agregado para blocos de concreto vazados	BOF, EAF e KR	Gao <i>et al.</i> , (2024); Triwigati (2024); Carvalho <i>et al.</i> , (2017)
Agregado para pavers de concreto	Escória de aciaria	Zhao <i>et al.</i> , (2024); Toffolo <i>et al.</i> , (2021); Georgiou e Loizos (2014); Da Silva <i>et al.</i> , (2016); Liu <i>et al.</i> , (2020)
Adição mineral	BFS e BOF	Tang <i>et al.</i> , (2025); Wei <i>et al.</i> , (2025); Zago <i>et al.</i> , (2020); Martins <i>et al.</i> , (2022), Carvalho <i>et al.</i> , (2024); Martins <i>et al.</i> , (2024);
Cimento álcali ativado	BFS, EAF e Escória de aciaria	Liao <i>et al.</i> , (2025); Guo <i>et al.</i> , (2024); Zhou <i>et al.</i> , (2024)
Argamassa	Escória de aciaria	Zha <i>et al.</i> , (2025); Castro Mendes <i>et al.</i> , (2020); Zhou <i>et al.</i> , (2025); Zha <i>et al.</i> , (2025)
Tratamento de água	Escória de aciaria	Xia <i>et al.</i> , (2025); Hawari <i>et al.</i> (2020); Özkök, Davis e Aydilek (2019)
Estabilização de solos	BSSF, EAF, KR e BOF	Diniz <i>et al.</i> , (2017); Schumacher <i>et al.</i> , (2022); Mugula <i>et al.</i> , (2025)
Novo tipo de cimento	Escória de aciaria, BSSF, EAF e KR	Carvalho <i>et al.</i> , (2023); Andrade <i>et al.</i> , (2021); Ryu <i>et al.</i> , (2024); Franco de Carvalho <i>et al.</i> , (2019).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dentre as diversas aplicações, o uso de resíduos siderúrgicos no sensoriamento estrutural tem apresentado resultados promissores como material complementar, no entanto, essa abordagem ainda é pouco explorada e não se encontra plenamente consolidada. Santillán *et al.*, (2022) reforçam a relevância da escória, sublinhando seu uso em aplicações que exploram propriedades funcionais como autodeteção, ampliando as possibilidades no campo do sensoriamento estrutural.

No estudo conduzido por Lee, Le e Kim (2019), a substituição total dos agregados miúdos por escória de aciaria em matrizes contendo fibras de aço e nanotubos de carbono demonstrou a capacidade do compósito de detectar fissuras ainda na fase elástica, antes da

ocorrência de rupturas na matriz. Esse resultado destaca o papel estratégico da escória como componente funcional no sistema.

O papel das escórias de aciaria no sensoriamento estrutural destaca-se em concretos multifuncionais de ultra alto desempenho. No estudo de Kang *et al.*, (2024), a substituição total do agregado miúdo por escória de alto-forno, em combinação com escórias granuladas e diferentes teores de fibra de carbono, demonstrou que a incorporação da escória de aciaria nesses materiais preserva suas propriedades piezoresistivas, ampliando sua funcionalidade como sensor integrado. Além disso, a utilização das escórias não apenas aprimora as características sensoriais do compósito, como também contribui para o aumento da resistência à compressão, conforme evidenciado nos estudos anteriormente mencionados, reforçando a viabilidade técnica e estrutural do material.

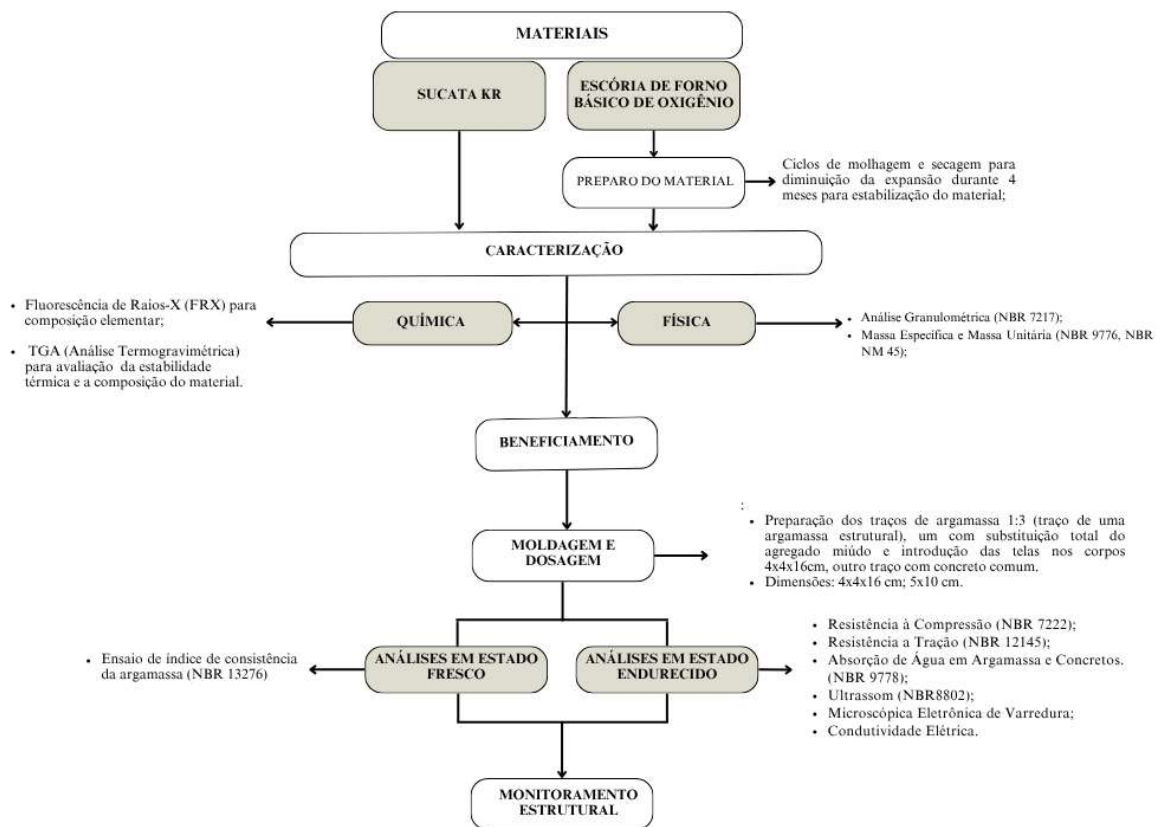
Com relação à Sucata KR, que é gerada no processo de dessulfuração do ferro-gusa líquido, ela possui pouca aplicação. Os estudos sobre seu aproveitamento concentram-se no tratamento dos metais (Liu e Bao, 2025), no desenvolvimento de novos ligantes (Cho e Choi, 2016) e em melhorias do próprio processo de dessulfuração (Li *et al.*, 2019). Essas aplicações, no entanto, são geralmente combinadas com outras escórias, e nenhuma delas utiliza o material de forma isolada ou distinta.

Em contrapartida, observa-se que, embora utilizem escórias em substituição ao agregado miúdo, todos esses estudos as combinaram com materiais à base de carbono. Complementando essa perspectiva, Liu *et al.*, (2024) enfatizam a urgência no desenvolvimento de sensores estruturalmente integrados que aliem alta eficiência, facilidade de instalação e baixo custo, sem comprometer a compatibilidade com estruturas de concreto. Solução essa que poderia ser feita através de sensores que utilizassem somente os resíduos siderúrgicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade verificar a viabilidade da utilização de resíduos siderúrgicos para o desenvolvimento de um compósito cimentício autossensorial. Foi elaborado o plano experimental apresentado na Figura 2, que ilustra de forma esquemática as etapas do estudo. Esse plano, abrange a seleção dos materiais (BOF e sucata KR), o preparo e a caracterização química e física, o beneficiamento, a moldagem e dosagem dos compósitos, bem como as análises em estado fresco e endurecido, culminando na avaliação da capacidade piezoresistiva.

Figura 2 - Fluxograma experimental.

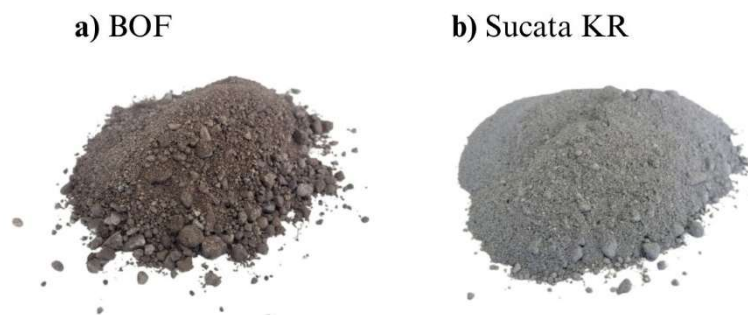


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1 Materiais

Para esta pesquisa, foram selecionados dois tipos de resíduos siderúrgicos: Forno Básico de Oxigênio (BOF) e pó de dessulfuração via Reator Kambara (KR). Os resíduos foram recebidos em diferentes granulometrias, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Resíduos siderúrgicos utilizados: (a) Escória BOF (b) Pó de dessulfuração KR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resíduos siderúrgicos foram obtidos com uma siderurgia do tipo Linz-Donawitz localizada no Porto do Pecém (Ceará). O material foi intemperizado pela técnica de envelhecimento acelerados, por meio de ciclos de molhagem e secagem durante 3 meses, diariamente, com um sistema de irrigação automatizado, para evitar expansão, conforme feito por Ma *et al.*, (2025) e Singh, Singh e Roy (2023). A sucata KR não apresenta essa demanda, devido à ausência de óxidos livres em sua composição, conforme a literatura.

O cimento Portland V – Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) foi adotado por ser composto por 90 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio, e de 0 a 10% de material carbonático, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), tendo assim um menor teor de substituição. Além disso, para ajuste da trabalhabilidade das 2 argamassas autossensoriais um aditivo superplastificante a base de éter policarboxilato da marca MC Bauchemie 3100.

4.2 Caracterização e Beneficiamento dos Materiais

Para a caracterização das escórias de aciaria KR e BOF, foram realizados ensaios físicos, químicos e termogravimetria, com o objetivo de avaliar suas propriedades e viabilidade para aplicação em compósitos cimentícios com potencial de monitoramento estrutural.

Para a identificação da composição química elementar das escórias, foi utilizada a técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), com o equipamento PANalytical Epsilon. Além disso, empregou-se a técnica de Análise Termogravimétrica (TGA), com o equipamento NETZSCH STA 449F3, para caracterizar as transformações químicas em função do aumento gradual da temperatura. O TGA foi realizado para avaliar o estado de intemperização do material. As taxas de variação de temperatura foram ajustadas em 10 °C/min, com a temperatura

de teste variando de 20 °C a 1000 °C. Para a realização dos ensaios de FRX e TGA foi necessário a preparação das amostras para as condições de realização de ensaio. Assim, os resíduos foram cominuídos manualmente com auxílio de um almofariz até toda a amostra ser passante na peneira de abertura de 75 micrômetros.

Com relação a caracterização física, foi realizada a análise granulométrica de cada tipo dos materiais, de acordo com os critérios estabelecidos pela norma NBR 7214 (ABNT, 2015). Foram determinados massa específica e massa unitária das escórias, conforme as normas NBR 9776 (ABNT, 2003) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. A massa específica fornece informações sobre a densidade real do material, enquanto a massa unitária está relacionada à densidade aparente, importante para compreender o comportamento e características do material.

Para produção dos agregados miúdos, a escórias BOF passou por um processo de cominuição, através de um britador de mandíbulas BB100, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. Inicialmente, uma parcela representativa do material foi selecionada e submetida à britagem no equipamento. O procedimento foi repetido três vezes para cada amostra, com o objetivo de promover uma redução granulométrica mais uniforme e adequada às etapas subsequentes do estudo. A sucata KR e o agregado convencional foram submetidos a segregação gravimétrica para adequação granulométrica. Todos os agregados foram utilizados na curva granulométrica ótima definida pela NBR 7214 (ABNT, 2015) (Tabela 2), visando garantir a comparabilidade entre as argamassas e minimizar a influência da granulometria no desempenho das matrizes, em conformidade com a especificação padrão para ensaios mecânicos de cimentos.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da areia normal

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras (mm)	Porcentagem retida em massa de material nas peneiras (%)
12	2,4 e 1,2	25 ± 5
Média grossa	1,2 e 06	50 ± 5
Média fina	0,6 e 0,3	75 ± 5
Fina	0,3 e 0,15	97 ± 3

Fonte: Adaptado NBR 7214/2015.

4.3 Produção das Argamassas Autossensoriais

As argamassas autossensoriais foram produzidas com um traço 1:3 (Tabela 3), conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram moldadas três composições de argamassas distintas: uma de referência (contendo agregado convencional) e duas com a substituição total do agregado miúdo convencional por resíduos siderúrgicos. Dentre essas últimas argamassas, foi produzido uma para cada tipo de escória de aciaria (BOF e KR), buscando o melhor enquadramento na curva granulométrica com o menor grau de beneficiamento. A relação água/cimento foi fixada em 0,55 para todos os traços. A trabalhabilidade foi controlada com um índice de consistência de 160 ± 10 mm, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), sendo ajustada por meio da incorporação do aditivo superplastificante (Tabela 3).

Tabela 3 - Teor de aditivo das argamassas.

Traço	Cimento	Agregado miúdo	Água	Teor de aditivo (%)
REF				0
BOF	1	3	0,55	0,25
KR				7,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4 Caracterização Física das Argamassas Autossensoriais

No estado endurecido, foram realizados ensaios para caracterizar as argamassas quanto às propriedades físicas e mecânicas. A Tabela 4 apresenta os ensaios realizados, os tamanhos dos corpos de prova, idade de teste e número de repetições.

Tabela 4 - Ensaios de caracterização das argamassas autossensoriais.

Teste	Idade de teste	Repetições	Dimensão	Protocolo
Resistência à compressão	7,14 e 28	3	4x4x16 cm	NBR 13279:2005 (ABNT, 2005)
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	28	3	5øx10 cm	NBR 9778:2009 (ABNT, 2009)
Velocidade de pulso ultrassônico	28	3	4x4x16 cm	NBR 8802:2019 (ABNT, 2019)
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	28	3	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

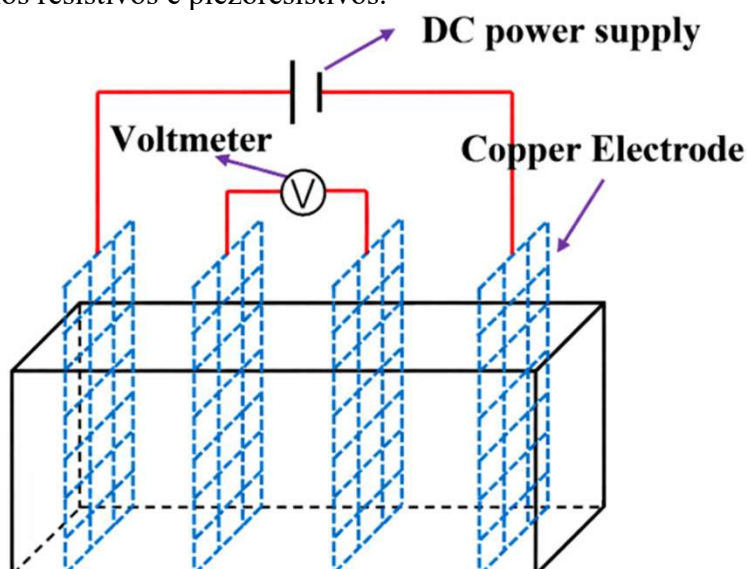
Para os ensaios mecânicos, foi utilizada uma máquina de ensaio universal EMIC DL 30000 (Instron), com uma célula de carga 300KN. O ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) utilizou o equipamento Pundit 200 (Proceq), um gel de contato foi aplicado nos transdutores de 54Hz utilizando o método de medição direto. A caracterização microestrutural foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Russas, utilizando um microscópio eletrônico de bancada TESCAN, modelo VEGA XMU. Para a análise, foram utilizados corpos de prova previamente submetidos ao ensaio de tração, os quais foram posteriormente reduzidos a dimensões até 100mm x 100mm, para possibilitar a avaliação da amostra no equipamento.

4.5 Avaliação da Capacidade Piezoresistiva das Argamassas Autossensoriais

Para a avaliação do comportamento elétrico e da capacidade piezoresistiva das argamassas, foram realizados dois ensaios experimentais, ambos baseados na reprodução de um circuito elétrico: um sem aplicação de carga mecânica, destinado à determinação dos parâmetros de resistividade elétrica, e outro com aplicação de carga, visando à análise do comportamento piezoresistivo do material. Em ambos os casos, foi empregada a técnica das quatro sondas (*four probe*), conforme metodologia adotada por Zhao e Qiang (2025), a fim de minimizar efeitos de contato e garantir maior precisão nas medições elétricas.

Para a execução dos ensaios, foram produzidos corpos de prova prismáticos com dimensões de $4 \times 4 \times 16$ cm, contendo eletrodos metálicos de 3×7 cm inseridos a 2 cm das extremidades e espaçados em 4 cm entre si (Figura 4). As avaliações foram realizadas aos 7, 14 e 28 dias de idade para o ensaio resistivo e 28 dias para o ensaio piezoresistivo.

Figura 4 - Amostra ensaios resistivos e piezoresistivos.



Fonte: Zhao e Qiang (2025).

Nessa metodologia, é monitorada a corrente elétrica, e o circuito é alimentado através da fonte de alimentação SKFA-03D (Skill-tec), com tensão contínua de 1.5V. A corrente foi monitorada através de uma medição em série, através um multímetro modelo 1110-a (Minipa). As ligações foram feitas por cabos do tipo ponta jacaré. Em seguida, as médias das resistividades elétricas dos corpos de prova de referência foram comparadas com aquelas obtidas nos compósitos com incorporação de cada tipo de escória, nos diferentes períodos de tempo.

O ensaio de resistividade elétrica foi conduzido com base na medição da corrente elétrica, com o objetivo de avaliar o desempenho condutivo das argamassas e identificar a composição com maior capacidade de condução elétrica. Adicionalmente, buscou-se analisar a estabilidade desse comportamento ao longo do tempo, a fim de verificar a durabilidade do sinal elétrico gerado pelo material.

Para o ensaio de piezoresistividade, foi utilizado um sistema experimental (*setup*), demonstrado na Figura 5, que era consistido na integração entre uma fonte de alimentação contínua, um circuito elétrico e a máquina universal de ensaios, permitindo o monitoramento simultâneo das respostas mecânicas e elétricas das argamassas. Além disso, a máquina universal de ensaios foi programada para a execução automática dos ciclos de carregamento, possibilitando a sincronização entre a aplicação das cargas mecânicas e o monitoramento contínuo da corrente elétrica durante os ensaios piezoresistivos.

Figura 5 - *Setup* Experimental.

Fonte: Adaptado pelo autor (2026).

Esse ensaio objetivou avaliar a resposta eletromecânica da argamassa. Cada corpo de prova foi submetido a cinco ciclos de compressão, com variação de carga entre 2 kN e 6 kN, aplicada à taxa de 1 kN/s. O procedimento experimental foi adaptado de Mesquita *et al.*, (2023), com modificações nos níveis de carregamento em relação ao estudo original. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios EMIC DL 20000 (Instron), permitindo o monitoramento da resposta da corrente elétrica em função das cargas aplicadas ao material. O ensaio foi repetido três vezes, feito uma média e comparado os valores de cada traço.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização Química dos Resíduos Siderúrgicos

A composição química dos resíduos é apresentada na Tabela 5. Os materiais são compostos pelos mesmos componentes, porém com percentuais diferentes. A escória BOF, possui uma quantidade significativa de óxidos de ferro (16,19%). Porém, se destaca por seu alto teor de Al_2O_3 (8,21%) e de SiO_2 (16,48%), provenientes do processo de fabricação do aço, sendo esses elementos bons condutores elétricos, o que contribui para a criação de um material piezoelétrico. Devido à presença de óxidos de alumínio, silício e ferro em sua composição, a escória BOF possui mais de 40% de componentes condutores.

Tabela 5 - Resultado da Fluorescência de Raio -X.

	Escória BOF (%)	Sucata KR (%)
CaO	34,99	58,59
Fe₂O₃	16,19	2,54
SiO₂	16,48	7,69
MgO	5,78	2,03
MnO	1,27	0,18
Al₂O₃	8,21	1,71
CO₂	14,85	20,25
TiO	0,35	0,12
SO₃	1,50	6,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por outro lado, a Sucata KR tem um alto teor de CaO (58,59%) e CO₂ (20,25%), o que indica uma grande quantidade de carbonatos, encontrada também por outros autores (Tian *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2022). Apesar disso, apresenta elementos condutores como os Al₂O₃ (1,71%), Fe₂O₃ (2,54%) e SiO₂ (7,69%).

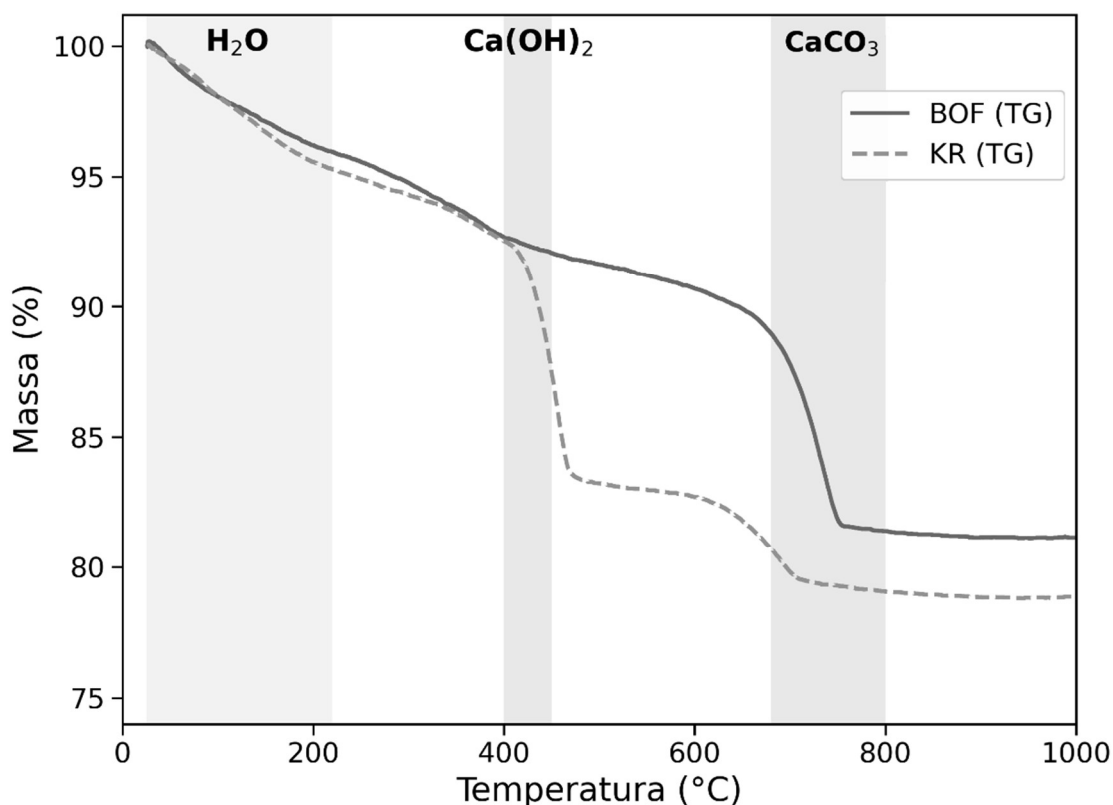
A Figura 6 mostra as curvas termogravimétricas (TG) das duas escórias, bem como suas respectivas perdas de massa em função do aumento da temperatura. Com relação aos resultados, as primeiras perdas de massa da escória BOF (Figura 6) ocorrem entre 25 °C e 220 °C, enquanto na sucata KR (Figura 6) iniciam entre aproximadamente 75 °C e 175 °C, sendo ambas associadas à evaporação de água livre e à desidratação de fases hidratadas. Esse comportamento é reportado na literatura (Bílek *et al.*, 2025) para materiais cimentícios e

escórias, sendo atribuído à remoção de água fisicamente adsorvida e à decomposição de fases como C-S-H e etringita.

As escórias BOF e KR apresentam uma perda de massa entre 400 °C e 450 °C, o que está de acordo com os resultados observados por Chang *et al.* (2019), sendo esse evento característico da desidroxilação da portlandita (Ca(OH)_2). Esse comportamento também é amplamente confirmado em estudos recentes, que associam picos nessa faixa à decomposição de Ca(OH)_2 em sistemas contendo escória de aciaria (Ye *et al.*, 2025). Nota-se, entretanto, que esse pico é mais pronunciado na sucata KR, indicando maior teor de hidróxidos livres, o que corrobora estudos recentes que apontam resíduos ricos em CaO como altamente reativos e suscetíveis à hidratação (Zhu *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2018).

Uma segunda perda de massa foi observada entre aproximadamente 590 °C e 700 °C, correspondente à decomposição de carbonatos menos estáveis, como o carbonato de magnésio (MgCO_3), comportamento semelhante ao descrito por Gumiere (2002). Já a terceira reação, comum a ambos os resíduos, ocorre entre 680 °C e 800 °C e está associada à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), conforme também reportado por Wang, Wei e Ni (2024) e por estudos recentes (Ye *et al.*, 2025) que indicam essa faixa como típica da decomposição de carbonatos formados durante processos de carbonatação de escórias. Além disso, outras pesquisas como He, Yang e Guo., 2024 mostram que a carbonatação de escórias BOF resulta na formação predominante de CaCO_3 , reforçando a interpretação dessa reação.

Figura 6 - Curva TG da Escória BOF e KR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A norma europeia EN 4550: Part 2:1970 também estabelece faixas de temperatura entre aproximadamente 520 °C e 900 °C para a decomposição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 em escórias de aço, valores consistentes com os encontrados neste estudo e combinados com pesquisas sobre estabilidade térmica de escórias (Wang e Huang., 2023), que indicam comportamento estável até altas temperaturas e decomposição progressiva de fases carbonatadas.

De forma comparativa, os resultados demonstram que a sucata KR apresenta maior teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 , evidenciado pela maior intensidade dos eventos térmicos nessas faixas de temperatura. Esse maior conteúdo de fases ricas em cálcio está em concordância com os resultados de FRX, que indicaram predominância de óxido de cálcio no resíduo de dessulfuração. Li *et al.*, 2025 também encontrou resultados similares, em que, escórias com maior teor de CaO apresentam maior grau de hidratação e carbonatação, resultando em maior formação de CaCO_3 . Por outro lado, a escória BOF apresenta comportamento térmico mais distribuído, sugerindo maior estabilidade mineralógica, o que está em conformidade com a literatura, que descreve esse material, quando estabilizado, com menor teor de CaO livre.

5.2 Caracterização Física dos Materiais

A caracterização física dos resíduos é apresentada na Tabela 6. A escória BOF apresentou uma massa específica de 2,948 g/cm³, valor inferior em comparação a sucata KR, devido à predominância de componentes minerais de baixa densidade, como o óxido de silício (SiO₂). A escória KR ficou com a maior densidade (3,28 g/cm³), devido a sua composição com carbonatos de alta densidade. Resultados semelhantes foram observados por Silva (2018) e Amâncio (2019). Segundo Baeza *et al.* (2018), essas composições com maior massa específica devem-se à presença de metais, uma vez que são materiais de elevada densidade.

Tabela 6 - Caracterização físicas dos resíduos siderúrgicos e da areia.

	Escória BOF	Sucata KR	Areia
Massa específica	2,95 g/cm ³	3,28 g/cm ³	2,61 g/cm ³
Massa unitária	1,80 g/cm ³	1,16g/cm ³	1,56 g/cm ³
Módulo de finura	3,99	2,65	1,86
DMC	9,5mm	9,5mm	4,75mm

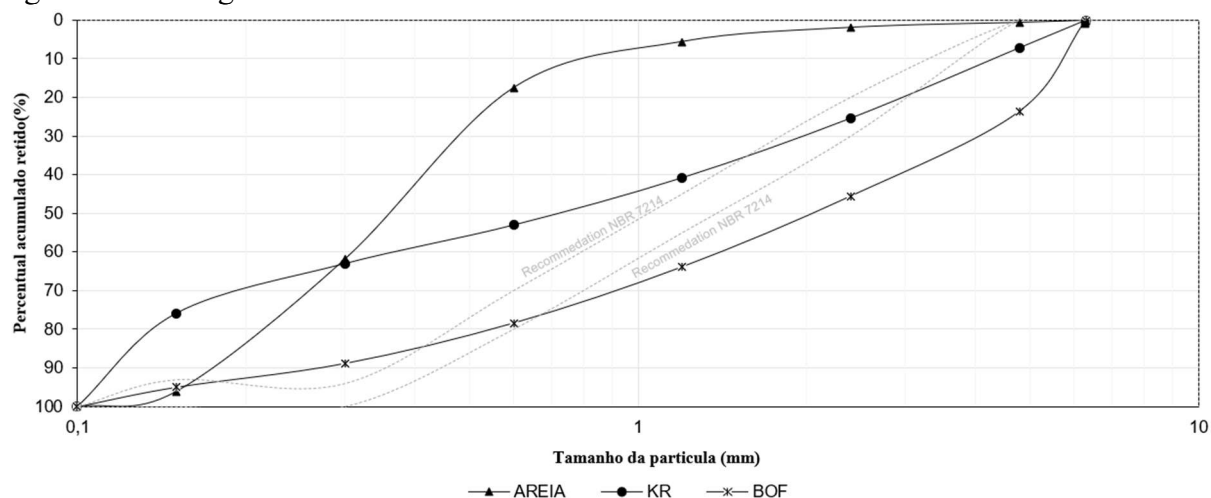
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A diferença entre os valores de massa específica e massa unitária sugere variações na porosidade e no empacotamento das partículas. A sucata KR possui uma massa específica relativamente alta e uma baixa massa unitária, isso é evidenciado pelo alto teor de CaO (58,59%) e CO₂ (20,25%), que estão associados à formação de compostos como carbonatos. Esse comportamento é típico de materiais com granulometria irregular, partículas de formato alongado ou poroso, que dificultam o empacotamento eficiente das partículas, resultando na diminuição da massa unitária e em uma estrutura com maior número de vazios.

O módulo de finura sugere que a escória BOF possui estrutura grosseiras, e módulos 3,99. A KR possui uma maior quantidade de finos, com módulo de 2,66. A distribuição granulométrica dos agregados é apresentada na Figura 7. As duas curvas analisadas, KR e BOF, apresentam diferenças significativas entre si. A curva KR demonstra uma distribuição granulométrica com menor distância entre a zona ótima da norma.

A curva granulométrica BOF exibe uma retenção moderada de partículas maiores e uma granulometria relativamente bem distribuída. Entretanto, como nenhum dos materiais avaliados se manteve dentro dos limites ótimos estabelecidos pela norma NBR 7214 (ABNT, 2015), todos necessitarão de beneficiamento.

Figura 7 - Curva granulométrica dos resíduos.



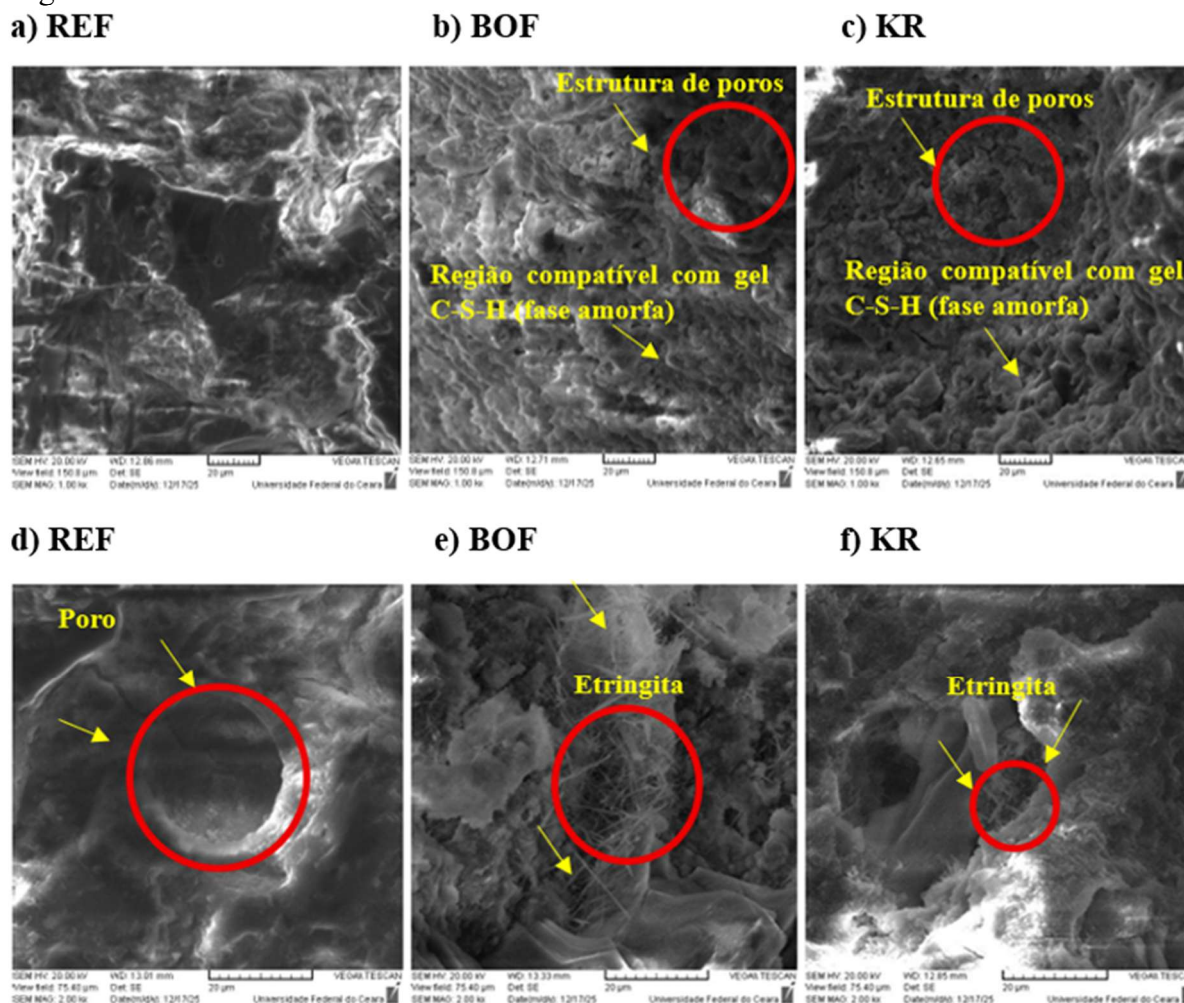
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As duas escórias analisadas apresentam Diâmetro Máximo Característico (DMC) de 9,5 mm, o que sugere a necessidade de beneficiamento para adequação ao DMC da areia de 2,36 mm, estabelecida pela norma NBR 7214 (ABNT, 2015). Essa diferença já havia sido observada durante a inspeção visual e foi confirmada pelos ensaios realizados.

5.3 Caracterização Física das Argamassas Produzidas

A Figura 8 apresenta as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras REF, BOF e KR, permitindo observar diferenças relevantes na morfologia e na formação dos produtos de hidratação. A análise das micrografias obtidas por MEV permite observar a formação de produtos de hidratação característicos, com destaque para a presença de estruturas associadas à etringita e a presença de uma matriz predominantemente amorfa, associada ao gel C-S-H. A quantidade dessas formações pode ser relacionada, de forma indireta, ao teor de enxofre disponível no sistema, uma vez que a etringita é um composto sulfatado resultante das reações entre aluminatos e sulfatos durante o processo de hidratação. Embora a sucata KR apresente elevado teor de carbonato de cálcio em sua composição, observa-se a formação de etringita em níveis mais moderados, indicando que as reações associadas aos sulfatos ocorreram de maneira controlada. Esse comportamento pode ser considerado favorável, uma vez que a formação excessiva de etringita pode estar associada a processos expansivos e à instabilidade volumétrica. Assim, os resultados indicam que o material KR apresenta reatividade adequada e potencialmente estável, especialmente no que se refere às reações envolvendo compostos sulfurados.

Figura 8 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das argamassas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na amostra de referência (REF), a matriz se mostra relativamente homogênea, com características compatíveis com o gel C-S-H. No entanto, chama atenção a presença de poros capilares de maior dimensão, indicando que o preenchimento da matriz pelos produtos de hidratação não ocorreu de forma tão eficiente. É importante destacar que as demais composições também apresentam poros, porém com dimensões menores e menor evidência, o que sugere uma estrutura mais refinada quando comparadas à referência.

Para a composição contendo escória BOF, observa-se uma matriz mais compacta, com regiões compatíveis com o gel C-S-H distribuídas de maneira mais uniforme. Além disso, são identificadas estruturas aciculares bem definidas, típicas da etringita, indicando que a escória contribui para uma maior atividade reacional do sistema. Esse comportamento sugere uma organização microestrutural mais densa em relação à amostra REF.

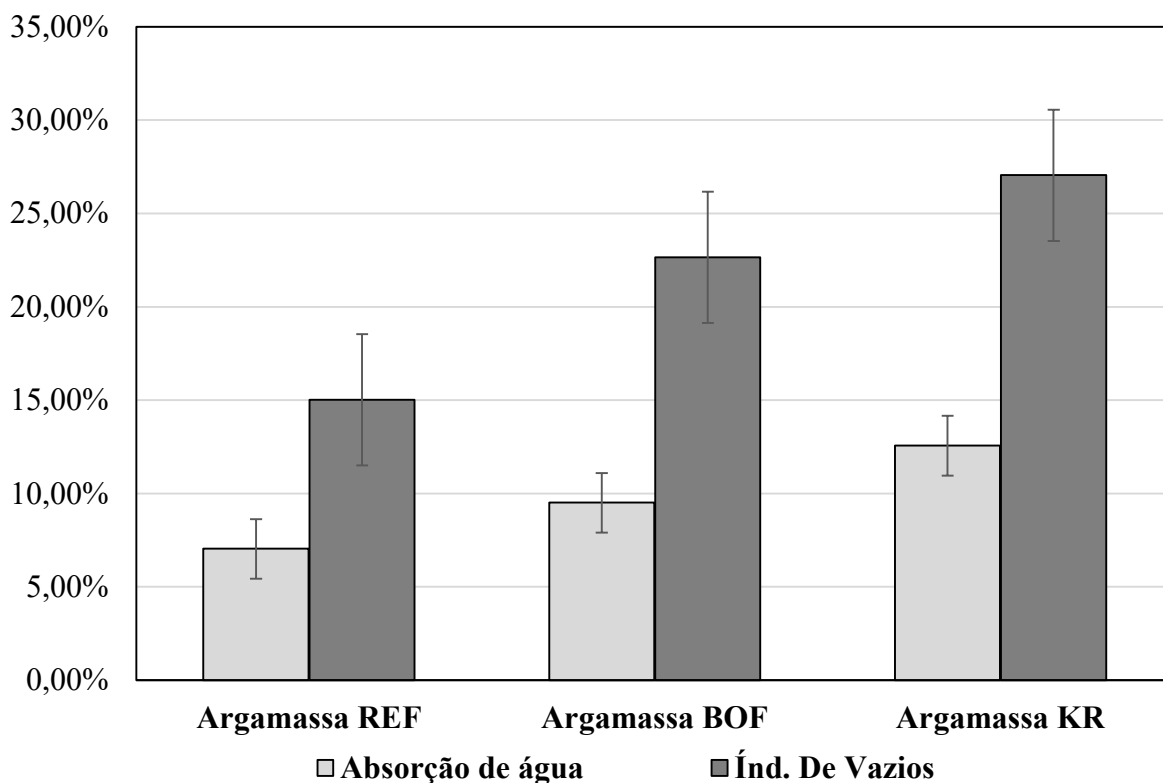
A amostra KR, por sua vez, também apresenta regiões associadas ao gel C-S-H, porém com uma distribuição menos uniforme. Ainda assim, a presença de estruturas aciculares indica a formação de etringita, evidenciando que o resíduo de dessulfuração participa das reações de hidratação, embora de forma menos homogênea quando comparado ao sistema com BOF. De modo geral, as amostras com incorporação de escórias (BOF e KR) apresentam uma maior presença de produtos cristalinos e uma matriz com poros de menores dimensões em comparação à referência. Esse comportamento indica que a adição desses resíduos promove modificações importantes na microestrutura, contribuindo para uma matriz mais refinada.

Essa alteração microestrutural está diretamente relacionada ao desempenho funcional dos compósitos, especialmente no contexto do autossensoriamento. A melhor distribuição dos produtos de hidratação demonstra que a matriz é mais coesa e que ocorreu uma adequada distribuição granulométrica no material, e a redução no tamanho dos poros tende a favorecer a formação de caminhos condutivos mais contínuos, o que pode resultar em uma resposta elétrica mais estável e sensível, mesmo em situações como as do material com resíduo KR, que possui maior quantidade de poros, porém de menor dimensão, possibilitando, assim, a formação de caminhos condutivos que propiciem a circulação da corrente elétrica. Em contrapartida, a presença de poros maiores, como observado na amostra de referência, pode atuar como descontinuidade na matriz, dificultando a condução elétrica.

A Figura 9 apresenta os resultados de absorção de água e índice de vazios para as argamassas REF, BOF e KR, permitindo avaliar a influência da incorporação dos resíduos siderúrgicos na porosidade do material. De modo geral, observa-se um aumento tanto na absorção quanto no índice de vazios nas misturas com escória, em comparação à amostra de referência.

Esse ensaio tem como principal objetivo avaliar a estrutura de poros das argamassas, uma vez que a absorção de água e o índice de vazios estão diretamente relacionados à conectividade dos poros no material. Nesse sentido, os resultados indicam que a incorporação dos resíduos promove alterações na microestrutura, refletindo em uma maior capacidade de absorção de água.

Figura 9 - Absorção de água e índice de vazios.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

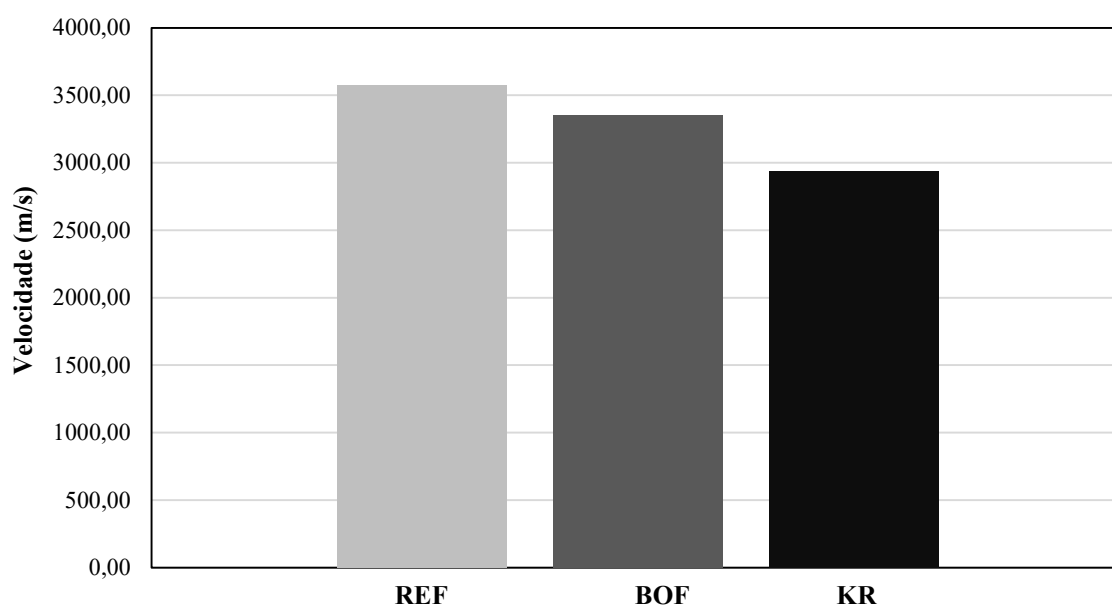
Ao comparar as composições, verifica-se que a argamassa BOF apresenta valores superiores aos da referência, indicando um aumento na porosidade do sistema. Esse comportamento é ainda mais evidente na argamassa KR, que apresentou os maiores valores entre as misturas analisadas. Essa diferença entre os resíduos pode estar associada às características físicas e químicas distintas de cada material, como granulometria, forma das partículas e composição mineralógica, que influenciam diretamente o empacotamento e a formação da matriz cimentícia.

Embora os poros da amostra de referência se apresentem em maiores dimensões, as misturas com resíduos tendem a apresentar uma maior quantidade de poros menores, o que contribui para o aumento do índice de vazios e da absorção. Além disso, podemos relacionar o resultado à natureza dos resíduos siderúrgicos, que podem apresentar maior rugosidade superficial e maior porosidade intrínseca, favorecendo a retenção de água. Estudos da literatura apontam que a incorporação de escórias de aciaria pode levar ao aumento da absorção de água, especialmente quando não há otimização da granulometria ou tratamento prévio do material, devido à maior dificuldade de empacotamento e à presença de fases menos reativas.

Adicionalmente, destaca-se que as amostras contendo resíduos demandaram maiores teores de aditivo superplastificante, em função de suas características físicas e químicas, o que pode ter influenciado o processo de cinética de cura e hidratação. Esse comportamento pode ter contribuído para a formação de uma microestrutura mais porosa, possivelmente associada a efeitos como exsudação ou incorporação de ar. Tal interpretação está em consonância com os resultados dos ensaios físicos e mecânicos, os quais indicaram maior porosidade e menores valores de resistência para essas amostras. Por outro lado, a forma como esses poros são formados revela muito sobre o comportamento do material.

A Figura 10 apresenta os resultados do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) para as composições analisadas. Observa-se, de forma clara, uma redução na velocidade de propagação das ondas na sequência REF, BOF e KR, indicando que a incorporação dos resíduos influencia diretamente na porosidade da matriz cimentícia.

Figura 10 - Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esse comportamento está associado à sensibilidade do ensaio à microestrutura do material, uma vez que a propagação das ondas ultrassônicas depende da continuidade do meio, sendo prejudicada pela presença de vazios, microfissuras e interfaces frágeis (Gehlot, 2016). Dessa forma, a redução da velocidade nas misturas com resíduos sugere um aumento da porosidade interna, com maior dispersão da energia da onda ao longo do material, o que é característico de matrizes menos densas e menos homogêneas.

Nesse contexto, a menor velocidade observada nas misturas com resíduos sugere uma estrutura com mais vazios, e conseqüentemente, com maior dispersão da energia da onda ao longo do material. Esse comportamento é coerente com o que é reportado na literatura, onde a técnica de VPU é utilizada como indicativo indireto da integridade do concreto, sendo capaz de identificar alterações microestruturais decorrentes de mudanças na composição ou na relação água/cimento.

Do ponto de vista normativo, o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico foi conduzido conforme as diretrizes da ABNT NBR 8802, que estabelece o procedimento para determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em concreto endurecido. No entanto, a referida norma não define critérios diretos para classificação da qualidade do material, sendo essa interpretação usualmente realizada com base em normas complementares e na literatura técnica, como a IS 13311 (Part 1:1992).

De acordo com essa norma, a qualidade do concreto pode ser avaliada em função da velocidade ultrassônica, sendo usualmente classificada como excelente para valores superiores a 4,5 km/s, boa entre 3,5 e 4,5 km/s, média entre 3,0 e 3,5 km/s e duvidosa para valores inferiores a 3,0 km/s. Essas faixas são amplamente adotadas em estudos experimentais como referência para análise da integridade interna de materiais cimentícios, sendo também coerentes com valores típicos reportados na literatura para concretos de boa qualidade, situados, em geral, acima de 3500 m/s.

Com base nesses critérios, verifica-se que a amostra de referência (REF) e a composição com escória BOF se mantêm dentro da faixa classificada como de boa qualidade, indicando adequada continuidade e compacidade da matriz cimentícia. Por outro lado, a composição contendo resíduo KR apresentou valores inferiores a 3,0 km/s, sendo, portanto, enquadrada na faixa de qualidade considerada duvidosa segundo a IS 13311.

Esse resultado, no entanto, deve ser analisado de forma criteriosa e no contexto do estudo. A classificação proposta pela norma está associada principalmente à avaliação de concretos convencionais com foco estrutural, não considerando, necessariamente, materiais modificados com resíduos ou com finalidade funcional. Nesse sentido, a redução mais acentuada da velocidade na mistura com KR pode ser atribuída ao aumento da heterogeneidade da matriz, à presença de interfaces mais frágeis e à possível elevação da porosidade, fatores que dificultam a propagação das ondas ultrassônicas.

Quando correlacionado com os demais ensaios realizados, esse comportamento tende a ser consistente com a resposta observada nas propriedades mecânicas e físicas, reforçando a

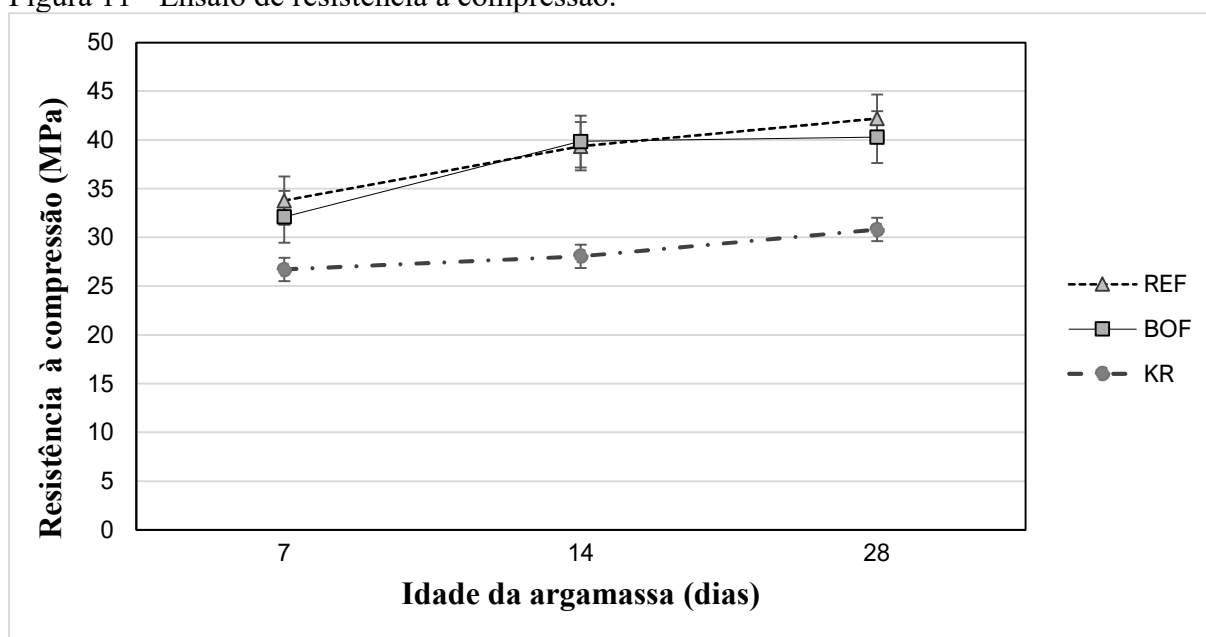
interpretação de que o resíduo KR promove uma matriz menos compacta em comparação às demais composições. Ainda assim, é importante destacar que a redução da VPU não implica, de forma isolada, na inviabilidade do material, mas sim em uma modificação de sua estrutura interna.

Além disso, no contexto específico deste trabalho, essa alteração pode estar associada a aspectos potencialmente favoráveis ao desempenho funcional do compósito. A introdução de descontinuidades controladas pode contribuir para a formação de caminhos preferenciais de condução elétrica, aumentando a sensibilidade do material em aplicações de monitoramento estrutural baseadas em variações de resistividade.

Dessa forma, embora a composição com KR apresente, sob a ótica da classificação normativa, uma qualidade inferior em termos de propagação ultrassônica, seus resultados devem ser interpretados em conjunto com os demais parâmetros avaliados. Assim, observa-se que há um equilíbrio entre a redução da compacidade da matriz e o potencial ganho em funcionalidade, o que reforça a importância de uma análise integrada dos resultados para avaliação da viabilidade do material.

A Figura 11 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas produzidas. De modo geral, observa-se que a incorporação da escória BOF resultou em desempenho mecânico semelhante ao traço de referência, enquanto o uso do resíduo KR promoveu redução da resistência ao longo das idades analisadas.

Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A avaliação em diferentes idades teve como objetivo acompanhar o desenvolvimento da resistência mecânica e verificar a influência dos resíduos no processo de hidratação e na consolidação da matriz cimentícia. Nesse sentido, nota-se que a argamassa com BOF manteve comportamento próximo ao da referência ao longo do tempo, indicando que sua incorporação não comprometeu a evolução das propriedades mecânicas. Esse resultado pode estar associado às características físicas do material, como granulometria e forma das partículas, que favorecem um empacotamento adequado e não promovem alterações significativas na microestrutura, conforme indicado nos ensaios de caracterização realizados.

Por outro lado, a argamassa contendo o resíduo KR apresentou desempenho inferior em todas as idades, sugerindo influência negativa na formação da matriz. Esse comportamento pode estar relacionado a uma maior absorção de água e, conseqüentemente, à redução da disponibilidade hídrica para as reações de hidratação do cimento, além de possíveis efeitos associados à porosidade. Resultados semelhantes são encontrados na literatura, onde a incorporação de escórias siderúrgicas pode levar à redução da resistência mecânica em função da elevada absorção de água e da substituição de agregados naturais, especialmente em teores mais elevados (Guo *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019; Omur *et al.*, 2023).

Além disso, ao correlacionar os resultados de resistência à compressão com os demais ensaios realizados, observa-se um comportamento consistente entre as propriedades mecânicas e a qualidade microestrutural das argamassas. As composições que apresentaram menores valores de resistência, especialmente aquelas com incorporação do resíduo KR, também tenderam a apresentar indícios de maior heterogeneidade interna, como observado nos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico. Essa relação reforça que a redução da resistência está associada não apenas à substituição do agregado, mas principalmente às alterações na compactidade da matriz e na qualidade da zona de transição interfacial (ITZ), região reconhecida como crítica para o desempenho mecânico de materiais cimentícios (Neville, 2016).

Do ponto de vista microestrutural, a menor resistência observada nas misturas com KR pode estar relacionada à formação de uma matriz mais porosa e menos coesa, decorrente tanto da maior absorção de água quanto da possível interferência do resíduo nas reações de hidratação. A presença de partículas com maior irregularidade e menor afinidade com a pasta cimentícia pode favorecer a formação de interfaces mais frágeis, reduzindo a capacidade do material de transferir tensões de forma eficiente. Esse efeito é amplamente discutido na literatura para materiais com incorporação de resíduos industriais, nos quais a qualidade da

interface pasta-agregado desempenha papel determinante no desempenho mecânico (Mehta e Monteiro, 2014).

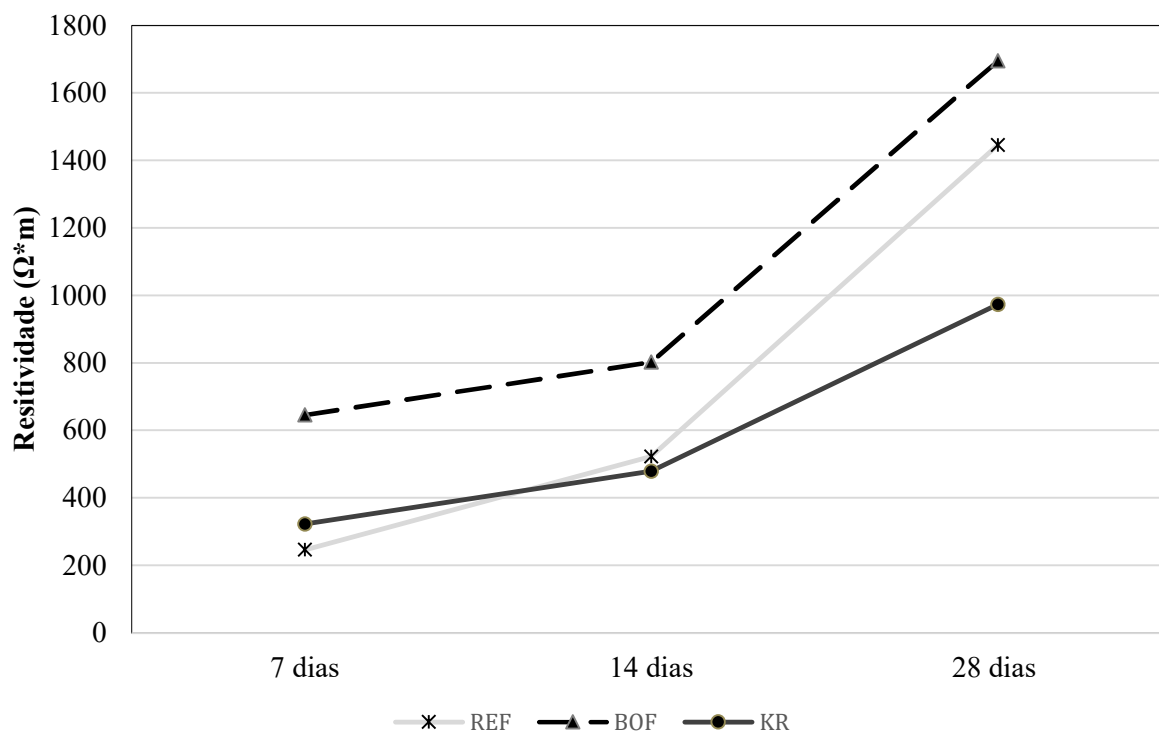
Entretanto, o comportamento da escória BOF, com resistência próxima à referência, indica que sua incorporação não compromete significativamente a integridade da matriz, podendo inclusive contribuir para uma distribuição mais eficiente das partículas no sistema. Esse resultado sugere que, nas condições avaliadas, a escória BOF apresenta maior compatibilidade com a matriz cimentícia quando comparada ao resíduo KR, o que pode estar associado a diferenças em sua composição, textura superficial e interação com a pasta.

5.4 Análise da Capacidade Piezoresistiva

A Figura 12 apresenta a evolução da resistividade elétrica dos compósitos ao longo do tempo de cura. De forma geral, observa-se aumento da resistividade com o avanço da idade para todas as misturas, indicando redução progressiva da capacidade de condução elétrica da matriz cimentícia. Esse comportamento é coerente com o processo de hidratação, pois, à medida que a matriz se torna mais densa e há refinamento da estrutura de poros, ocorre diminuição da mobilidade iônica e maior dificuldade para a passagem da corrente elétrica. Essa elevação da resistividade ao longo da cura é associada à redução da água livre nos poros e à descontinuidade dos caminhos de condução, especialmente quando a condução depende fortemente da fase líquida presente na matriz (Frac *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2019). Estudos com compósitos cimentícios contendo nanomateriais de carbono (Guo *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2024; Kim, 2022) mostram, inclusive, que a resistividade costuma aumentar com a idade quando a rede condutiva não está suficientemente percolada, pela redução da contribuição da água nos poros para o transporte de carga elétrica.

Em matrizes cimentícias, essa condução ocorre tanto por via iônica, associada à solução de poros, quanto por caminhos condutivos sólidos, sendo que a redução da fase líquida e a reorganização da matriz podem aumentar a resistividade quando não há uma rede condutiva eficiente estabelecida (Chen *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

Figura 12 - Resistividade das argamassas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao comparar os compósitos, percebe-se que a incorporação das escórias alterou essa propriedade de forma distinta, o que indica que o tipo de resíduo influencia diretamente a formação e a estabilidade da rede condutiva. Esse resultado deve ser associado aos ensaios físicos da argamassa, especialmente absorção de água e índice de vazios: matrizes com maior porosidade e maior volume de vazios tendem a apresentar condução mais dependente da solução dos poros, enquanto matrizes mais compactas favorecem caminhos sólidos mais estáveis.

Assim, embora o compósito com KR tenha apresentado maior quantidade de vazios, estes são predominantemente de menor dimensão, o que pode favorecer um melhor empacotamento e uma distribuição mais eficiente das fases condutivas. Esse aspecto contribui para explicar a manutenção de uma resposta elétrica mais favorável ao longo do tempo. Além disso, a presença de poros mais finos e melhor distribuídos pode favorecer a interação entre as fases sólidas, contribuindo para a formação de caminhos condutivos mais contínuos.

Da mesma forma, as observações em MEV indicaram regiões com boa aderência entre partículas e menor ocorrência de descontinuidades críticas, reforçando a interpretação de que há maior continuidade dos caminhos condutivos nesse compósito. Além disso, por se tratar de uma escória com presença de fases potencialmente condutoras, o KR pode contribuir

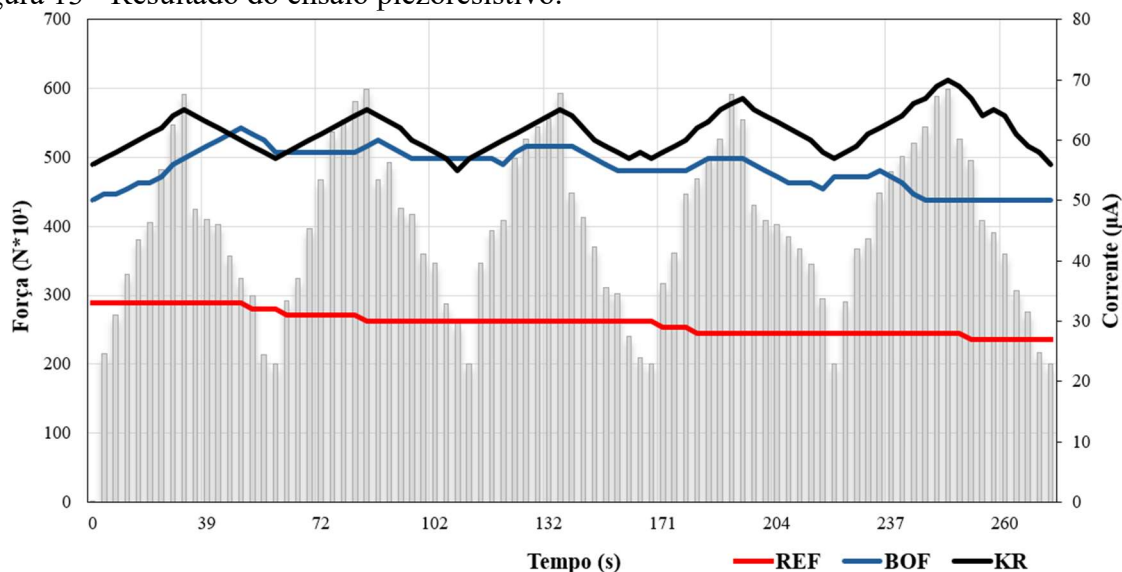
diretamente para a formação de uma rede condutiva mais eficiente. A literatura (Ou *et al.*, 2024; Lin *et al.*, 2024; Roshan *et al.*, 2024) aponta que a resistividade elétrica e o desempenho autossensorial são fortemente influenciados pela porosidade, como também, pela conectividade dos poros e pela qualidade da rede condutiva formada no compósito.

A Figura 13 permite observar que a variação da corrente elétrica acompanha a aplicação dos ciclos de carregamento, confirmando a resposta piezoresistiva dos compósitos submetidos a carregamentos cíclicos. De forma geral, verifica-se que os materiais responderam de maneira distinta à aplicação de força, o que evidencia diferentes níveis de sensibilidade eletromecânica. Materiais com rede condutiva mais sensível apresentam maiores variações elétricas quando submetidos a deformações, uma vez que pequenas alterações na distância entre partículas e nos pontos de contato resultam em mudanças significativas na condução elétrica.

A amostra de referência apresenta comportamento mais estável ao longo dos ciclos, com redução gradual da corrente elétrica e ausência de resposta piezoresistiva significativa, o que é esperado, uma vez que a matriz cimentícia, por si só, não apresenta boa condutividade elétrica. Já os compósitos com escória, em especial aquele com KR, apresentam resposta elétrica mais evidente durante os ciclos de carregamento, indicando maior capacidade de converter estímulos mecânicos em sinais elétricos.

O compósito com escória BOF apresenta comportamento intermediário, com resposta elétrica perceptível, porém menor quando comparada à KR, sugerindo a formação de uma rede condutiva menos sensível às variações estruturais do carregamento. Esse comportamento pode ser explicado pelas características da argamassa, especialmente por fatores como porosidade, distribuição das fases condutivas e proximidade ao limiar de percolação elétrica. Sistemas que apresentam rede condutiva mais próxima desse limiar tendem a ser mais sensíveis, pois pequenas deformações são suficientes para alterar significativamente a conectividade entre partículas. Assim, a maior resposta observada para a sucata KR indica que essa composição favoreceu a formação de uma rede condutiva mais responsiva às variações mecânicas, enquanto a mistura com BOF, embora condutiva, apresentou menor sensibilidade eletromecânica.

Figura 13 - Resultado do ensaio piezoresistivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O compósito contendo KR apresentou correntes elétricas mais elevadas, situadas predominantemente na faixa de aproximadamente 55 a 70 μA , enquanto o BOF apresentou valores intermediários ($\approx 45\text{--}55 \mu\text{A}$) e o traço de referência os menores níveis ($\approx 25\text{--}30 \mu\text{A}$). Esse comportamento indica uma maior eficiência na condução elétrica e, conseqüentemente, melhor formação de caminhos condutivos no compósito com KR. Nesse sentido, o comportamento observado para o traço de referência e para o BOF, com menores níveis de corrente, é compatível com sistemas com rede condutiva menos eficiente. Adicionalmente, variações piezoresistivas da ordem de até 10% são reportadas para compósitos com nanotubos de carbono (D'Alessandro *et al.* 2016 e 2021), indicando que a resposta elétrica sob carregamento ocorre mesmo em materiais com diferentes níveis de condutividade. Assim, os valores obtidos neste estudo, especialmente para o compósito com KR, mostram-se compatíveis com aqueles relatados na literatura, evidenciando que o material apresenta desempenho elétrico equivalente ao de compósitos autossensoriais, ainda que utilizando resíduos siderúrgicos em substituição a materiais condutivos convencionais.

Observa-se, ainda, que os resultados de resistividade e piezoresistividade apresentam concordância entre si. A mistura que apresentou maior condução elétrica foi também aquela que demonstrou maior sensibilidade eletromecânica sob carregamento. Essa relação é consistente com a literatura, que aponta que sistemas próximos ao limiar de percolação elétrica tendem a apresentar simultaneamente menor resistividade e maior sensibilidade piezoresistiva, devido à maior instabilidade da rede condutiva frente a variações estruturais (Li *et al.*, 2024).

Dessa forma, os resultados obtidos não apenas são coerentes entre si, mas também indicam que a resposta observada está diretamente relacionada à estrutura interna do composto.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi possível avaliar a viabilidade do uso de resíduos siderúrgicos, especificamente a escória BOF e a sucata de dessulfuração KR, como materiais funcionais para aplicação em matrizes cimentícias com potencial piezoresistivo.

A caracterização química evidenciou que ambos os resíduos possuem composição semelhante em termos de constituintes, porém com diferenças significativas nos percentuais. A escória BOF destacou-se pelo elevado teor de óxidos de silício, alumínio e ferro, totalizando mais de 40% de componentes potencialmente condutores, o que favorece sua aplicação em sistemas cimentícios com resposta elétrica. A sucata KR, por sua vez, apresentou altos teores de CaO e CO₂, associados à presença de carbonatos, característica confirmada pelos ensaios termogravimétricos.

A análise térmica (TG) mostrou comportamentos compatíveis com os descritos na literatura para escórias siderúrgicas, com eventos associados à perda de água, desidroxilação do Ca(OH)₂ e decomposição de carbonatos, validando a estabilidade térmica dos materiais e corroborando os resultados obtidos por FRX.

Do ponto de vista físico, a escória BOF apresentou menor massa específica em comparação à sucata KR, enquanto esta última apresentou maior densidade, porém menor massa unitária, indicando maior porosidade e menor eficiência de empacotamento. As curvas granulométricas demonstraram que ambos os resíduos necessitam de beneficiamento para adequação às exigências normativas, especialmente em relação ao diâmetro máximo característico.

Nos ensaios das argamassas, observou-se que todos os traços apresentaram resistência mecânica satisfatória, com valores superiores a 30 MPa, evidenciando que a substituição parcial por resíduos siderúrgicos não comprometeu o desempenho mecânico do material. Entretanto, a sucata KR apresentou os maiores índices de vazios e absorção de água, refletindo diretamente em menores valores de resistência e de velocidade de pulso ultrassônico, indicando uma matriz mais porosa.

As análises microestruturais reforçaram esses resultados, mostrando que o traço de referência apresentou uma microestrutura mais contínua, enquanto os traços BOF e KR exibiram estruturas cristalinas mais evidentes, sendo mais pronunciada no material com sucata KR, que apresentou maior quantidade de vazios e interfaces menos coesas.

No que se refere ao comportamento elétrico, os ensaios de resistividade indicaram aumento progressivo da resistividade ao longo do tempo para todos os materiais, associado principalmente à redução do teor de umidade da matriz cimentícia. Ainda assim, o traço com sucata KR apresentou os menores valores de resistividade, indicando maior condutividade elétrica entre os materiais avaliados.

O ensaio de piezoresistividade confirmou esse comportamento, demonstrando que a argamassa com sucata KR apresentou a melhor resposta ao longo dos ciclos de carregamento, acompanhando de forma consistente as variações de carga aplicadas. O traço com escória BOF apresentou resposta inicial satisfatória, porém com redução da sensibilidade nos ciclos subsequentes, possivelmente associada a efeitos capacitivos e ao armazenamento temporário de carga elétrica. O traço de referência, por sua vez, não apresentou resposta piezoresistiva significativa.

Além disso, o sistema experimental desenvolvido para os ensaios piezoresistivos mostrou-se adequado para a aquisição simultânea dos dados mecânicos e elétricos, permitindo o acompanhamento das variações de resistividade durante os ciclos de carregamento. A integração entre o circuito elétrico e a máquina universal de ensaios possibilitou a avaliação do comportamento autossensorial dos compósitos cimentícios de forma satisfatória, demonstrando a viabilidade do *setup* proposto para aplicações em monitoramento estrutural.

Dessa forma, conclui-se que a sucata KR apresentou o melhor desempenho global em termos de resposta elétrica e piezoresistiva, apesar de suas limitações mecânicas associadas à maior porosidade. Já a escória BOF demonstrou bom equilíbrio entre resistência mecânica e resposta elétrica inicial, configurando-se como um material promissor para aplicações em sistemas de monitoramento estrutural. Os resultados obtidos reforçam o potencial do reaproveitamento de resíduos siderúrgicos como alternativa sustentável e funcional para o desenvolvimento de compósitos cimentícios inteligentes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, observa-se que ainda existem aspectos que podem ser aprofundados em trabalhos futuros, visando uma melhor compreensão do comportamento dos compósitos cimentícios com a incorporação de resíduos siderúrgicos, bem como a ampliação de suas possibilidades de aplicação.

- Avaliar diferentes combinações de resíduos siderúrgicos na matriz cimentícia, buscando um equilíbrio otimizado entre desempenho mecânico, condutividade elétrica e resposta piezoresistiva, por meio da comparação com um sensor de deformação comercial, a fim de equiparar as respostas obtidas.
- Realizar ensaios de durabilidade, como ataque por cloretos, carbonatação, ciclos de molhagem e secagem e ataque por sulfatos, a fim de verificar a estabilidade da resposta piezoresistiva ao longo do tempo e em condições agressivas.
- Avaliar a incorporação de materiais complementares condutores, como fibras metálicas, fibras de carbono ou aditivos condutivos, visando melhorar a conectividade elétrica da matriz e reduzir os efeitos de perda de sensibilidade observados em alguns traços.
- Avaliar os impactos ambientais e econômicos do uso desses resíduos siderúrgicos, por meio de análises de ciclo de vida (ACV) e estudos de viabilidade, reforçando o caráter sustentável da proposta.

REFERÊNCIAS

- AÇO BRASIL. Geração específica de coprodutos e resíduos (kg/t aço bruto). Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>.
- ADEGOLOYE, G. et al. Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 171-178, 2016.
- ALACERO. Mini anuário 2024: indústria do aço em números. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/publicacoes/>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- AMÂNCIO, Francisco Anderson. Avaliação da utilização de escória de aciaria como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas mistas. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45512/5/2019_dis_faamancio.pdf.
- ANDRADE, Humberto Dias et al. Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123910, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45:2006. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9776:2003. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276:2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 17054:2022 – Agregados reciclados para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C597/C597M – Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, ano de publicação da versão utilizada

Baeza, F. J. et al. (2018). Influence of recycled slag aggregates on the conductivity and strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement mortars. **Construction and Building Materials**, 184, pp. 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.218>.

BARRIAS, Antonio; CASAS, Joan R.; VILLALBA, Sergi. Fatigue performance of distributed optical fiber sensors in reinforced concrete elements. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 214-223, 2019.

BÍLEK JR, Vlastimil et al. Comparison of thermogravimetry response of alkali-activated slag and Portland cement pastes after stopping their hydration using solvent exchange method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 2, p. 1013-1037, 2025.

BHATIA, V. *Optical fiber sensors*. In: BUSCHOW, K. H. J. et al. (ed.). **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [S.l.]: Elsevier, 2001. p. 6822–6830. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0122274105004415>. Acesso em: 6 maio 2025.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 13311 (Part 1): 1992 – Non-destructive testing of concrete – Methods of test: Ultrasonic pulse velocity**. New Delhi, 1992.

CAUSADO MENDOZA, Luis Eduardo. Utilização do pó de escória de desulfuração do reator Kambara como agente estabilizador de solo argiloso para camadas de pavimentação. 2023. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

CAVALIERE, Pasquale; Clean ironmaking and steelmaking processes: efficient technologies for greenhouse emissions abatement. **Springer International Publishing**, 2019.

CARÍSIO, P. A. et al. Dispersion of carbon nanotubes with different types of superplasticizer as a dispersing agent for self-sensing cementitious materials. **Applied Sciences**, v. 11, n. 18, p. 8452, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188452>.

CARVALHO, Victor Rezende et al. Dual admixtures for cement-based composites comprising steel slag powder and residual lignin-based liquor. **Journal of Cleaner Production**, v. 475, p. 143639, 2024.

CARVALHO, Victor Rezende et al. Performance of low-energy steel slag powders as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 131888, 2023.

CARVALHO, J. C. L. et al. Study of mechanical behavior of block for structural masonry produced with steel slag in substitution of natural aggregates. **Masonry International**, v. 30, n. 2, p. 31-38, 2017.

CASTRO MENDES, Júlia et al. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1569-1586, 2020.

CHANG, Jun et al. Foaming characteristics and microstructure of aerated steel slag block prepared by accelerated carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 222-233, 2019.

CHEN, Minghui et al. Multifunctional Cement Composites with Conductive Aggregates for Electromagnetic Interference Shielding Applications. **Wenqiang and Xiao, Huigang and Sun, Yubo, Multifunctional Cement Composites with Conductive Aggregates for Electromagnetic Interference Shielding Applications.**

CHEN, Pu-Woei; CHUNG, D. D. L. Concrete reinforced with up to 0.2 vol% of short carbon fibres. **Composites**, v. 24, n. 1, p. 33-52, 1993.

CHO, Bongsuk; CHOI, Hyeonggil. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 436-443, 2016.

CHU, Hongqiang et al. Magnetic field enhancing preferred orientation of nickel-cobalt plated carbon fibers in cement paste, with relevance to compression self-sensing. **Measurement**, v. 220, p. 113396, 2023.

COSTA, Laís Cristina Barbosa et al. Eco-efficient steel slag concretes: an alternative to achieve circular economy. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, p. e15201, 2021.

COSTA, L. C. B. et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 318, p. 126152, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126152>.

COSTA, Laís Cristina Barbosa et al. Utilizing steel slag to prolong the durability of reinforced concrete: Corrosion resistance mechanisms. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111505, 2024.

COSTA, R. A.; SOUZA, M. P.; ALMEIDA, L. M. Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado utilizando sensores de resistência elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 27, n. 3, p. 215-230, 2017.

D'ALESSANDRO, A. et al. Improved strain sensing properties of cement-based sensors through enhanced carbon nanotube dispersion. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 115, p. 103842, 2021.

D'ALESSANDRO, A. et al. Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 65, p. 200–213, 2016.

DAVIS, A. M.; MIRSYAR, M. M.; HARTL, D. J. A novel structural health monitoring approach in concrete structures using embedded magnetic shape memory alloy components. **Construction and Building Materials**, v. 311, p. 125212, 13 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125212>.

DA SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 4, 2016.

DENG, Zhizhong et al. Piezoresistive performance of self-sensing bitumen emulsion-cement mortar with multi-walled carbon nanotubes. **Cement and Concrete Composites**, v. 153, p. 105718, 2024.

DIEGUEZ, Ana Carolina de Oliveira. Utilização de escória de reator Kambara na composição do cimento Portland. 2018.

DINESH A., INDHUMATHI S., PICHUMANI M. Self-sensing cement composites for structural health monitoring: From know-how to do-how, **Automation in Construction**, Volume 160, 2024, 105304, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105304>.

DINESH, A.; SUJI, D.; PICHUMANI, Moorthi. Self-sensing cementitious composite sensor with integrated steel fiber and carbonaceous powder for real-time application in large-scale infrastructures. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 353, p. 114209, 2023.

DINESH, A. et al. Carbon black based self-sensing cement composite for structural health monitoring—A review on strength and conductive characteristics. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

DINIZ, Dayse Horta et al. Blast oxygen furnace slag as chemical soil stabilizer for use in roads. **Journal of materials in civil engineering**, v. 29, n. 9, p. 04017118, 2017.

DING, Yung-Chin et al. Study on the treatment of BOF slag to replace fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 644-651, 2017.

DONG, Wenkui et al. Piezoresistive behaviours of carbon black cement-based sensors with layer-distributed conductive rubber fibres. **Materials & design**, v. 182, p. 108012, 2019.

DONG, Wenkui et al. Piezoresistive properties of cement-based sensors: Review and perspective. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 146-163, 2019.

D'ALESSANDRO, Antonella et al. Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 200-213, 2016.

ELSEADY, Amir AE et al. Self-sensing and piezoresistive performance of carbon fibre textile-reinforced cementitious composites under tensile loading. **Composite Structures**, p. 118897, 2025.

EUROPEAN STANDARD. BS EN 4550-2 – Methods of testing.cement. Reino Unido, 1970.

FAN, J. et al. Fatigue performance of ordinary concrete under discontinuous cyclic loading. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 974-981, 2018.

FAN, W.; QIAO, P. Métodos de identificação de danos baseados em vibração: uma revisão e estudo comparativo. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 1, p. 83-111, 2011.

FANG.Y., L.Y. Li, S.H. Jang. Calculation of electrical conductivity of self-sensing carbon nanotube composites. **Compos. Part B Eng.**, 199 (2020), Article 108314, 10.1016/j.compositesb.2020.108314.

FRAÇ, Maksymilian et al. Effect of internal moisture on the electric conductivity of cement composites with expanded graphite determined by impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Composites**, v. 151, p. 105610, 2024.

FRANCO DE CARVALHO, José Maria et al. Low environmental impact cement produced entirely from industrial and mining waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 2, p. 04018391, 2019.

GHADHBAN, Dhurgham; JONI, Hasan H.; AL-DAHAWI, Ali M. Carbon fiber-based cementitious composites for traffic detection and weighing in motion. **Engineering and Technology Journal**, v. 39, n. 8, p. 1250-1256, 2021.

GAO, K. et al. Review of flexible piezoresistive strain sensors in civil structural health monitoring. **Applied Sciences**, v. 12, 2022.

GAO, Zihe et al. Recent research progress on the direct carbon capture of steel slag to prepare building materials. **Green and Smart Mining Engineering**, 2024.

GEHLOT, Tarun. Study of concrete quality assessment of structural elements using Ultrasonic Pulse Velocity Test. 2016.

GEORGIU, Panos; LOIZOS, Andreas. A laboratory compaction approach to characterize asphalt pavement surface friction performance. **Wear**, v. 311, n. 1-2, p. 114-122, 2014.

GHOLAMI, Reza et al. Development of a laser induced graphene (LIG) and polylactic acid (PLA) shape memory polymer composite with simultaneous multi-stimuli response and deformation self-sensing characteristics. **Nanoscale Advances**, v. 6, n. 19, p. 4865-4876, 2024.

GIORDANO, Pier Francesco; QUQA, Said; LIMONGELLI, Maria Pina. The value of monitoring a structural health monitoring system. **Structural safety**, v. 100, p. 102280, 2023.

GRAFFITTI, D. F. (2002). Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GWON, Gi-Hun; JUNG, Hyung-Jo. A survey of generative models for image-based structural health monitoring in civil infrastructure. **Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience**, p. 100138, 2025.

GUMIERE, Adriana Guerra. Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos. Porto Alegre, 2002. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GUO, Erdong et al. Enhancement of cement-based materials: Mechanisms, impacts, and applications of carbon nanotubes in microstructural modification. **Buildings**, v. 15, n. 8, p. 1234, 2025.

GUO, Lingzhi et al. Mechanical properties and microstructure evolution of alkali-activated GGBS-fly ash-steel slag ternary cements. **Construction and Building Materials**, v. 444, p. 137727, 2024.

GUO, Yongchang et al. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal-and high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 41-49, 2019.

GUO, Yongchang et al. Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 194-201, 2018.

GUO, Yipu et al. Self-sensing performance of cement-based sensor with carbon black and polypropylene fibre subjected to different loading conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 59, p. 105003, 2022.

HAN, B. et al. Influences of CNT dispersion and pore characteristics on the electrical performance of cementitious composites. **Composite Structures**, v. 164, p. 32–42, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.049>

HAN, Jinsheng et al. Impact resistance of self-sensing engineered cementitious composite (ECC) under different temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e04077, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04077>.

HAN, Jinsheng et al. Preparation of self-sensing engineered cementitious composites (ECC) sensor and its sensing performances in concrete column. **Measurement**, v. 241, p. 116611, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116611>.

HAWARI, Alaa H. et al. Steel slag promoted electrocoagulation process for the treatment of produced water. **Desalination and Water Treatment**, v. 177, p. 80-88, 2020.

HE, Zhiguo et al. Integrated structural health monitoring in bridge engineering. **Automation in construction**, v. 136, p. 104168, 2

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. ISO 3310-1:2016 – Test sieves – Technical requirements and testing – Part 1: Test sieves of metal wire cloth. Geneva, 2016.022.

H.; LI J.; NI, W. et al. 2022. Optimization of the whole-waste binder containing molten iron desulfurization slag from Kambara Reactor for concrete production. **Journal of Building Engineering**, v. 54, n. 104594.

JIANG, Liang et al. Formation of spinel phases in oxidized BOF slag under different cooling conditions. **Steel Research International**, v. 88, n. 11, p. 1700066, 2017.

JIANG, X. et al Advancing carbon nanomaterials-engineered self-sensing cement composites for structural health monitoring: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, v. 87, 2024. Artigo 109129. DOI: 10.1016/j.job.2024.109129.

KANG, Jung-goo; KANG, Gyeong-o. Engineering characteristics of high-weight aged BOFs-dredged soil backfill for port structure: Shear properties, unit weight, strength, and microstructure characteristics. **Case Studies in Construction Materials**, v. 23, p. e05126, 2025.

KANG, Munhwa et al. Effect of steel slag on the mechanical properties and self-sensing capability of ultra-high performance concrete (UHPC). **Developments in the Built Environment**, v. 17, p. 100342, 2024.

KANG, Min-Chang et al. Self-sensing properties of cementless ultra-high performance concrete (UHPC) with slag aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 86, p. 108863, 2024.

KANG, G., et al. (2024). Real-time structural health monitoring of carbon fiber-reinforced plastic sandwich structures with carbon nanotube-dispersed core using electromechanical behavior data. **Polymer Testing**, 136, 108471 <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108471>

KANG, X. et al. A concise review of state-of-the-art sensing technologies for bridge structural health monitoring. **Sensors**, v. 25, 2025

KHALID, Ihtisham et al. Structural Health Monitoring of aerospace thin plate and shell structures using the inverse finite element method (iFEM). **Thin-Walled Structures**, v. 209, p. 112923, 2025.

KHALID, Muhammad Yasir et al. Rise of graphene in novel piezoresistive sensing applications: A review on recent development and prospect. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 163, p. 100891, 2025.

KHAN, Alamgir et al. Self-sensing performance of the CAC-based MWCNT/NCB composite at high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 455, p. 139113, 2024.

KIM, J. S. Enhanced effects of carbon-based conductive materials on the piezoresistive characteristics of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127804, 2022.

KONSTA-GDOUTOS, Maria S.; AZA, Chrysoula A. Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 162-169, 2014.

LE, Duc-Phong. et al. Development of smart high-performance cementitious composites with self-sensing ability for structural health monitoring systems. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 358, p. 114276, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424723007690>.

- LEE, Seon Yeol; LE, Huy Viet; KIM, Dong Joo. Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 149-160, 2019.
- LIAO, Yishun et al. Calcium sulfoaluminate cementitious materials with steel slag and calcined phosphogypsum: Hydration and physico-mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 460, p. 139795, 2025.
- LI, Meng et al. Drawdown mechanism of light particles in baffled stirred tank for the KR desulphurization process. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 27, n. 2, p. 247-256, 2019.
- LI, Shaojie et al. Surface-treated carbon nanotubes in cement composites: Dispersion, mechanical properties and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125262, 2021.
- LI, Wengui et al. Development of self-sensing ultra-high-performance concrete using hybrid carbon black and carbon nanofibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 148, p. 105466, 2024.
- LI, Yarong et al. Dissolution characteristics of steel slag in aqueous solution and preparation of high purity CaCO₃. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 198, p. 107183, 2025.
- LI, Yinglong et al. A review of the application of steel slag in concrete. In: **Structures**. Elsevier, 2024. p. 106352.
- LI, Yubo et al. A self-sensing high strength grout used in prefabricated construction: the hybrid effects of carbon black and micro steel fiber. **Case Studies in Construction Materials**, p. e04271, 2025.
- LIN, Wei-Ting et al. Feasibility and characterization mortar blended with high-amount basic oxygen furnace slag. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 6, 2018.
- LIN, Zhengxiang et al. Piezoresistive performance of cement-based composites with two-dimensional MXene subjected to various loading conditions and water content. **Cement and Concrete Composites**, v. 150, p. 105554, 2024.
- LIU, Qiong et al. Strain monitoring for a bending concrete beam by using piezoresistive cement-based sensors. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 338-347, 2018.
- LIU, Wenhuan et al. The interfacial adhesion performance and mechanism of a modified asphalt–steel slag aggregate. **Materials**, v. 13, n. 5, p. 1180, 2020.
- LIU, Xin; BAO, Yan-ping. Resource utilization strategy of Kanbara Reactor (KR) slag: Oxidation desulfurization, material cycle, low-carbon green pathway. **Process Safety and Environmental Protection**, p. 106880, 2025.

LIU, Zhijie et al. Development and properties of cost-effective self-sensing Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating steel slags. **Construction and Building Materials**, v. 449, p. 138502, 2024.

MA, Huan-Chi et al. Autogenous shrinkage model for concrete with weathered steel slag coarse aggregate. In: **Structures**. Elsevier, 2025. p. 108862.

MA, Yukun et al. Structural health monitoring and quantitative safety evaluation methods for ancient stone arch bridges. **Journal of Cultural Heritage**, v. 70, p. 366-380, 2024.

MANO, E. B., *Polímeros como materiais de engenharia 2º Reimpressão 1º ed.*, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 2000.

MARDANI, M. et al. Piezoresistivity and mechanical properties of self-sensing CNT cementitious nanocomposites. **Construction and Building Materials**, v. 349, p. 128127, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128127>

MARDANSHAH, A. et al. Sensing techniques for structural health monitoring: a state-of-the-art review. **Sensors**, v. 25, 2025.

MARTINS, Ana Carolina Pereira et al. Influence of a LAS-based modifying admixture on cement-based composites containing steel slag powder. **Journal of Building Engineering**, v. 53, p. 104517, 2022.

MARTINS, Leticia Matias et al. Thermal insulating coating mortars with mining and steel residues and the proposition of a “thermal insulating admixture”. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 26, n. 3, p. 1432-1449, 2024.

MASCIOTTA, M.-G.; RAMOS, L. F.; LOURENÇO, P. B. The importance of structural monitoring as a diagnostic and control tool in the restoration process of heritage structures: a case study in Portugal. **Revista do Patrimônio Cultural**, v. 27, p. 36-47, Oct. 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.04.003>.

MENDES, Júlia Castro et al. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 648-661, 2017.

MENÉNDEZ, E. et al. Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 360, 2022

MESQUITA, Esequiel et al. Investigation of the electrical sensing properties of cementitious composites produced with multi-wall carbon nanotubes dispersed in NaOH. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107496, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MU, Tong et al. Shape memory polymers for composites. **Composites Science and Technology**, v. 160, p. 169-198, 2018.

MUGULA, Julius et al. Sustainable stabilization of sandy soils using steel slag and biopolymer cellulose. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04555, 2025.

NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2016.

NUNES, Vitor A. et al. Pre-treatment of BOF steel slag aggregates and effect on the mechanical and microstructure properties of alkali-activated mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 91, p. 109562, 2024.

OLIVEIRA, C. A.; MARTINS, D. P.; SOUZA, R. S. Aplicação de sensores de fibra óptica no monitoramento de integridade estrutural de pontes e edifícios. *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Civil*, v. 45, p. 312-320, 2020.

OLIVEIRA BRIDI, Lucas. 2020. Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

OMUR, Tarik et al. Utilization and optimization of unweathered and weathered basic oxygen furnace slag aggregates in cement based mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 64, p. 105634, 2023.

ÖZALP, Fatih. Effects of electric arc furnace (EAF) slags on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, v. 329, p. 127159, 2022.

PAPACHRISTOFOROU, M.; ANASTASIOU, E. K.; PAPAYIANNI, I. Durability of steel fiber reinforced concrete with coarse steel slag aggregates including performance at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120569, 2020.

PARK, Jong-Hwan et al. Enhancement of phosphorus removal with near-neutral pH utilizing steel and ferronickel slags for application of constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 612-621, 2016.

PIAO, Rongzhen et al. Synergistic effect of nickel and graphite powders on the thermoelectric properties of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and MWCNTs. **Cement and Concrete Composites**, v. 154, p. 105778, 2024.

PIRES, Patricio Moreira et al. 2019. Laboratory and Field Evaluation of KR slag-Stabilized Soil for Paving Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n.9, p. 04019182.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

PRUDENTE, Isis Nayra Rolemberg et al. Graphene family (GFMs), carbon nanotubes (CNTs) and carbon black (CB) on smart materials for civil construction: Self-cleaning, self-sensing and self-heating. **Journal of Building Engineering**, p. 110175, 2024.

RIBEIRO, Mariana FA; SANTOS, Paulo OB. **A inspeção predial conforme a ABNT NBR 16747: 2020 e sua importância na prevenção de catástrofes.** 2021.

ROJAS, M. et al. Prediction of electrical resistivity of concrete containing electric arc furnace slag as fine aggregate. **Buildings**, v. 15, 2025

ROSHAN, Mohammad Jawed et al. Performance of self-sensing cement-stabilized sand under various loading conditions. **Sensors**, v. 24, n. 6, p. 1737, 2024.

RYU, Geun U. et al. Utilization of steelmaking slag in cement clinker production: A review. **Journal of CO2 Utilization**, v. 84, p. 102842, 2024.

SANCHEZ F., SOBOLEV K. Nanotechnology in concrete - A review. **Constr. Build. Mater.**, 24 (11) (2010), pp. 2060-2071, 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014

SANTAMARÍA, Amaia et al. The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 1, p. 231-243, 2020.

SANTILLÁN, Ninel et al. Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 360, p. 129515, 2022.

SANTOS, G. L.; MELO, V. F.; BARROS, H. R. Uso de acelerômetros na predição de falhas em estruturas de concreto armado. **Revista de Engenharia Estrutural**, v. 36, n. 4, p. 55-67, 2019.

SARKAR, Sanjana; HEGDE, Amarnath. Reliability assessment of steel slag and construction waste backfill for reinforced earth structures using response surface method. **Soils and Foundations**, v. 65, n. 1, p. 101569, 2025.

SAXENA, Shekhar; TEMBHURKAR, A. R. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 126-137, 2018.

SCHUMACHER, A. G.; GOMES, G. J. C.; SCHNEIDER, D. S. G.; PIRES, P. J. M.; GOMES, R. G. 2022. Blending Linz-Donawitz, and Blast Furnace slags with the Kambara reactor byproduct to improve their reuse in roadworks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 24, p. 2555-2568.

SEO, Joonho et al. Material characterization and piezoresistive sensing capability assessment of thin-walled CNT-embedded ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 134, p. 104808, 2022

SEZER, Gözde İnan; GÜLDEREN, Mert. Usage of steel slag in concrete as fine and/or coarse aggregate. 2015.

SHEN, Aiqin et al. Mechanism of adhesion property between steel slag aggregate and rubber asphalt. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 32, n. 24, p. 2727-2740, 2018.

SHEN, Zhaoyang et al. The metamaterial sensors for multi-parameter measurement in structural health monitoring. **Measurement**, v. 245, p. 116652, 2025.

SHI, C.; QIAN, J. High performance cementing materials from industrial slags. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 29, n. 3, p. 195–207, 2000.

SILVA, E. F.; COSTA, M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. Aplicação de strain gauges na análise da integridade estrutural de materiais compostos. **Journal of Structural Monitoring**, v. 10, n. 1, p. 22-35, 2018.

SILVA, Wanner Kelly Damasceno da. Caracterização de escórias de aciaria como agregados para a construção civil. 2018. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SINGH, Pavitar; SINGH, Heaven; ROY, AB Danie. Sustainably produced concrete using weathered Linz-Donawitz slag as a fine aggregate Substitute: A comprehensive study with Artificial intelligence approach. In: **Structures**. Elsevier, 2023. p. 964-980.

SONG, Facheng; LI, Qinghua; XU, Shilang. A review of self-sensing ultra-high performance concrete: Towards next-generation smart structural materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 145, p. 105350, 2024.

SUCHORZEWSKI, Jan; PRIETO, Miguel; MUELLER, Urs. An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120871, 2020.

SUN, Keke et al. Utilization of BOF steel slag aggregate in metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124024, 2021.

OU, Xiaoduo et al. Improving electrical and mechanical properties of cement composites by combined addition of carbon black and carbon nanotubes and steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 438, p. 136931, 2024.

TANG, Waiching et al. Utilization of carbonated steel slag as fine sand in OPC concrete and mortar. **Results in Engineering**, v. 25, p. 103716, 2025.

TIAN, E.; LIU, Y.; CHENG, X.; ZENG, W. 2022. Characteristics of Pavement Cement Concrete Incorporating Steel Slag Powder. **Advances in Materials Science and Engineering**.

TIAN, Zhuang et al. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 177, p. 107437, 2019.

TOFFOLO, R. V. M. et al. Roller-compacted concrete pavements produced entirely with steelmaking slag aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 118, n. 4, p. 51-64, 2021.

TRIWIGATI, Purnaning Tuwuh et al. Investigation of pH swing carbon mineralization for valuable element recovery and CO₂ sequestration using steelmaking slag. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2024.

WANG, Hui et al. The application of electrical parameters to reflect the hydration process of cement paste with rice husk ash. **Materials**, v. 12, n. 17, p. 2815, 2019.

WANG, Junlei; HUANG, Yun. Exploration of steel slag for thermal energy storage and enhancement by Na₂CO₃ modification. **Journal of Cleaner Production**, v. 395, p. 136289, 2023.

WANG, L.; ASLANI, F. Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: A comprehensive review. **Materials Today Communications**, v. 36, 2023.

WANG, Shuai; DENG, Weili; YANG, Weiqing. Superhydrophobic stretchable sensors based on interfacially self-assembled carbon nanotube film for self-sensing drag-reduction shipping. **RSC advances**, v. 14, n. 36, p. 26505-26515, 2024.

WANG, Xue; WEI, Xinlei; NI, Wen. Impacts of hydration degree of steel slag on its subsequent CO₂ capture behaviors and mechanical performances of prepared building materials. **Construction and Building Materials**, v. 416, p. 135075, 2024.

WANG, Zhuang et al. Evaluation of piezoresistive response and mechanical performance of self-sensing asphalt concrete mixed with different lengths of carbon fiber. **Construction and Building Materials**, v. 462, p. 139942, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.139942

WEI, Huijie et al. A new gelling material: Properties of recycled aggregate concrete under conditions of complete cement replacement using steel slag, ore slag, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 464, p. 140180, 2025.

WEN, Sihai; CHUNG, D. D. L. Electrical-resistance-based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement. **Carbon**, v. 45, n. 4, p. 710-716, 2007.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Steel industry co-products*. Brussels, 2023.

WOO, Jin-Seok et al. Effects of ultrasonication on electrical and self-sensing properties for fiber-reinforced cementitious composites containing MWCNTs. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 34, p. 1509-1528, 2025.

XIA, Ting et al. Investigation of steel slag after direct wet carbonation and its efficiency in water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 68, p. 106500, 2024.

XU, Wei et al. Ultrasensitive and superelastic high-performance aerogel based on hollow carbon nanofiber/graphite composite with piezoresistive sensing applications. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100629, 2024.

XU, Yan et al. Efficient in-site laser scanning scheme with adaptive angular resolution for long-span bridge geometry measurement. **Measurement**, v. 232, p. 114704, 2024.

YANG, Ziqian et al. Concrete implantable bar enabled smart sensing technology for structural health monitoring. **Cement and Concrete Composites**, v. 139, p. 105035, 2023.

YASSIN, M. H.; FARHAT, M. H. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review. **Discover Civil Engineering**, v. 4, 2024.

YAO, Riwu. et al. Self-sensing joints for in-situ structural health monitoring of composite pipes: A piezoresistive behavior-based method. **Engineering Structures**, v. 308, 1 jun. 2024, Article 118049. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118049.

YE, Wei et al. Enhancing steel slag cement mortar performance under low-temperature curing through alkali activation: mechanisms and implications. **Frontiers in Materials**, v. 12, p. 1576078, 2025.

YIN T. , et al. Increasing self-sensing capability of carbon nanotubes cement-based materials by simultaneous addition of Ni nanofibers with low content. *Build. Mater.* , 254 (2020) , Article 119306 , 10.1016/j.conbuildmat.2020.119306

YU, X. et al. Piezoresistive behaviors of self-sensing cementitious composite with well-dispersed carbon nanotube. **Construction and Building Materials**, v. 474, p. 141123, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141123>

Y.W. Lim, J. Jin, B.S. Bae, Optically transparent multiscale composite films for flexible and wearable electronics. **Adv Mater**, 32 (2020), Article 1907143

ZHA, Wenhua et al. Optimized the performance of conductive mortar with hybrid fiber and steel-slag via RSM and MOPSO. **Construction and Building Materials**, v. 459, p. 139776, 2025.

ZHANG, Y., YANG, J., LIU, Z., et al. (2020). "Recent advances in structural health monitoring based on vibration data: An overview." **Sensors**, 20(18), 5295.

ZHAO, Yunpeng; QIANG, Sheng. Exploring the potential of bayer red mud: Toward self-sensing cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 460, p. 139850, 2025.

ZHAO, Weixiang et al. Research on the performance of asphalt mixture with acid-treated steel slag based on microscopic properties. **Construction and Building Materials**, v. 455, p. 139134, 2024.

ZHOU, Hongfei et al. An eco-friendly and low-cost superhydrophobic alkali-activated Portland slag cement mortar. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03057, 2024.

ZHOU, Zhenhao et al. Long-term volume stability of steel slag sand mortar and concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04179, 2025.

ZHU, Fuxia et al. Experimental investigation and mechanism analysis of direct aqueous mineral carbonation using steel slag. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 81, 2024.