



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ELIDIEL PEIXINHO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
SUCATA KR

RUSSAS
2025

ELIDIEL PEIXINHO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
SUCATA KR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará - Campus
Russas, como requisito parcial para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

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

RUSSAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A446a Almeida, Elidiel Peixinho de.
Avaliação da estabilidade de argamassas produzidas com sucata KR / Elidiel Peixinho de Almeida. – 2025.
38 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia Civil, Russas, 2025.
Orientação: Profa. Dra. Laís Cristina Costa Barbosa.
1. Sucata KR. 2. Argamassas. 3. Estabilidade. 4. Resíduos siderúrgicos. 5. Economia circular. I. Título.
CDD 620
-

ELIDIEL PEIXINHO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
SUCATA KR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará - Campus
Russas, como requisito parcial para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.^a Dra. Bruna Silva Almada
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Elói Romão dos Santos Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela sabedoria, discernimento, coragem e resiliência concedidos ao longo desta jornada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional e por sempre se dedicarem para que este sonho se tornasse realidade.

À professora Laís Costa, pela generosidade em compartilhar conhecimento, pelas oportunidades concedidas e pela constante motivação. Sua orientação e confiança foram fundamentais, e sua dedicação certamente deixa uma marca na formação de muitos engenheiros.

À minha namorada, Zuely, pelo apoio nos momentos mais difíceis. Sou grato pelo companheirismo, paciência e encorajamento em todas as etapas deste caminho.

Ao meu amigo Rhuan Cavalcante, *in memoriam*, por me acolher em Russas como parte da família e por sua amizade sincera, que permanece viva na memória e no coração.

Aos colegas e amigos conquistados ao longo da graduação, em especial a Francisco Marques, que sempre me ajudou com sua brilhante inteligência.

À Karol, pela colaboração direta no desenvolvimento deste trabalho e pela parceria durante o processo.

Aos meus irmãos Ricardo, Aline e Yasmin, pelo apoio constante e pelas palavras de incentivo em cada etapa dessa empreitada.

Aos técnicos de laboratório, Allisson e Myckelle, pela dedicação, paciência e prontidão em auxiliar nos ensaios e atividades de laboratório.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado à leitura deste trabalho e por aceitarem o desafio de avaliá-lo em uma situação atípica, com profissionalismo e generosidade.

RESUMO

A indústria siderúrgica brasileira gerou aproximadamente 18,4 milhões de toneladas de resíduos em 2023, entre eles o pó de dessulfuração do ferro-gusa produzido pelo Reator Kambara, conhecido como sucata KR. Esse subproduto ainda é pouco estudado quanto à sua aplicação na construção civil, especialmente como agregado em argamassas. Devido ao seu elevado teor de enxofre e fração fina significativa, existem preocupações quanto à trabalhabilidade, resistência mecânica e estabilidade dessas misturas. Neste trabalho, foi avaliada a substituição parcial e total da areia natural pela sucata KR em argamassas de assentamento. Foram produzidas três formulações: uma de referência, uma com 50% e outra com 100% de substituição do agregado miúdo. Inicialmente, foram realizadas análises físicas, químicas e morfológicas do resíduo, incluindo ensaios de granulometria, fluorescência de raios X, MEV e EDS. Em seguida, as argamassas foram avaliadas em relação a consistência, resistência à compressão e estabilidade dimensional sob condições hidrotérmicas. Os resultados mostraram que o elevado teor de finos da sucata KR exigiu maior consumo de água para atingir a trabalhabilidade desejada, o que implicou em queda significativa da resistência à compressão, especialmente na formulação com 100% de substituição. No entanto, todas as misturas se mantiveram estáveis ao longo de 28 dias de exposição a alta umidade e temperatura, sem ocorrência de fissuras ou expansão prejudicial. A argamassa com 50% de substituição demonstrou desempenho equilibrado e indicou potencial para aplicações não estruturais, como revestimentos, onde coesão e aderência são mais relevantes do que resistência mecânica. A utilização da sucata KR como agregado representa uma alternativa viável para o reaproveitamento de resíduos industriais e contribui para práticas sustentáveis alinhadas à economia circular na construção civil.

Palavras-chave: sucata KR; argamassas; estabilidade; resíduos siderúrgicos; economia circular.

ABSTRACT

In 2023, the Brazilian steel industry generated approximately 18.4 million tons of industrial residues, among which stands out the KR slag, a by-product from the desulfurization of hot metal using the Kambara Reactor (KR). Despite its potential, this material remains underutilized in civil construction due to concerns regarding its high sulfur content and fine particle fraction, which can affect workability and long-term durability of cement-based composites. This study aimed to assess the mechanical performance and dimensional stability of rendering mortars in which natural sand was partially or totally replaced by KR slag. Three mortar mixes were produced: a reference mix with natural sand, one with 50% sand replacement, and another with 100%. Physical, chemical, and morphological characterizations of the slag were conducted, including granulometric analysis, X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The mortars were then evaluated in terms of consistency, compressive strength evaluation, and accelerated expansion analysis under hydrothermal conditions. The results showed that the high fines content in the KR slag increased water demand to achieve proper workability, which contributed to a notable reduction in compressive strength, particularly in the mix with 100% replacement. Nonetheless, all mixes exhibited satisfactory dimensional stability over 28 days of exposure to aggressive conditions, with no signs of cracking or internal sulfate attack. The mix with 50% KR slag replacement demonstrated balanced performance and showed potential for non-structural applications, such as coatings and plasters, where cohesion and adherence are critical parameters. Incorporating KR slag as a fine aggregate emerges as a technically feasible and environmentally responsible alternative that aligns with circular economy practices in the construction industry.

Keywords: KR slag; mortars; durability; steelmaking residue; circular economy.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOF	Basic Oxygen Furnace (Forno Básico a Oxigênio)
BFS	Blast Furnace Slag (Escória de Alto-Forno)
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CP	Cimento Portland
DMC	Diâmetro Máximo Característico
DEF	Delayed Ettringite Formation (Formação Tardia de Ettringita)
EDS	Electric Arc Furnace (Forno Elétrico a Arco)
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
FRX	Fluorescência de Raios X
IABR	Instituto Aço Brasil
KR	Kambara Reactor (Reator Kambara)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira (emitida pela ABNT)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
REF	Argamassa de Referência
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção do aço.	14
Figura 2 - Fluxograma do programa experimental.	21
Figura 3 - Curva granulométrica da areia.	22
Figura 4 - Sucata KR.	22
Figura 5 - Curva granulométrica da sucata KR.	26
Figura 6 - Sucata KR <i>in natura</i>	28
Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura da sucata KR.	28
Figura 8 - Índice de consistência e fator água/cimento das argamassas.	29
Figura 9 - Espalhabilidade das argamassas (a) REF; (b) KR50; (c) KR100.	30
Figura 10 - Média das resistências à compressão das argamassas.	31
Figura 11 - Ruptura dos corpos de prova cúbicos (a) REF; (b) KR50; (c) KR100.	32
Figura 12 - Expansibilidade das argamassas sob condições hidrotérmicas.	32
Figura 13 - Argamassas nos dias (a) 0; (b) 1; (c) 2; (d) 3; (e) 4; (f) 5; (g) 7; (h) 16; (i) 28.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traços das argamassas produzidas.....	24
Tabela 2 - Composição química da sucata KR obtida através do FRX.....	25
Tabela 3 - Composição química da sucata KR obtida através do MEV/EDS.	26
Tabela 4 - Características físicas da sucata KR.	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO DA LITERATURA	14
3.1	Resíduos Siderúrgicos	14
3.1.1	<i>Sucata Kambara Reactor (KR)</i>	17
3.2	Ataques por Sulfatos	19
3.2.1	<i>Hidratação do Cimento Portland</i>	19
3.2.2	<i>Mecanismos do Ataque por Sulfatos</i>	20
4	METODOLOGIA	21
4.1	Materiais	21
4.2	Caracterização da Sucata KR	23
4.3	Produção das Argamassas	23
4.4	Avaliação de Desempenho	24
5	RESULTADOS	25
5.1	Caracterização Química	25
5.2	Caracterização Física	26
5.3	Caracterização Morfológica	27
5.4	Estado Fresco	29
5.5	Estado Endurecido	30
5.6	Análise de Expansibilidade	32
6	CONCLUSÃO	34
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	34
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do crescimento populacional tem gerado impactos significativos como o aumento no consumo de recursos naturais, colocando em evidência a necessidade de repensar práticas tradicionais. Nesse contexto, a construção civil se destaca pela materialização desse crescimento e pelo uso intensivo de matérias-primas naturais, sendo responsável por uma parcela considerável da extração de agregados em todo o mundo. Somente em 2022, o Brasil consumiu aproximadamente 640 milhões de toneladas de agregados, sendo que a areia representou cerca de 58% desse total, o que equivale a 374 milhões de toneladas (ANEPAC, 2022). Tais números evidenciam a demanda crescente de recursos naturais e a necessidade urgente de se buscar alternativas viáveis e sustentáveis para suprir a demanda do setor.

Paralelamente a essa realidade, observa-se um crescimento significativo na geração de resíduos industriais. Nesse cenário, a indústria siderúrgica brasileira se destaca. Em 2023, o setor gerou 18,4 milhões de toneladas de resíduos (IABR, 2024). Uma parte desses subprodutos já encontra aplicação na construção civil. Um exemplo é a escória de alto-forno, amplamente aplicada na produção de cimento Portland do tipo III (CP III), conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). Além disso, a aplicação da escória de aciaria já é bastante estudada, principalmente como agregados e adição mineral (Costa, 2019; Carvalho *et al.*, 2024). Entretanto, outros subprodutos da indústria siderúrgica, como o pó de dessulfuração, proveniente do Reator Kambara (KR), utilizado no tratamento do ferro gusa, ainda são pouco explorados e demandam estudos mais aprofundados que apresentem seu comportamento e possíveis aplicações.

A escassez de pesquisas voltadas especificamente para aplicação desse pó de dessulfuração, comumente chamado de sucata KR, representa uma lacuna no conhecimento técnico sobre o aproveitamento desse resíduo. Isso se deve à baixa produção desse resíduo, haja vista que o processo de dessulfuração pode acontecer de diversas outras formas além do Reator Kambara. Devido à natureza de sua geração, a sucata KR possui teores significativos de sulfato (Meneguete, 2018), que podem levar à formação de etringita tardia na matriz cimentícia e, consequentemente, expansão e fissuras.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), buscam, entre outras coisas, a proteção do meio ambiente e do clima, a fim de garantir bem-estar e prosperidade para as gerações presentes e futuras (ONU BR, 2025). Alinhado a isso, o presente trabalho baseia-se nos ODS 9 e 12. O objetivo 9 “Indústria, inovação e infraestrutura”, busca promover uma industrialização inclusiva,

sustentável e resiliente, enquanto o objetivo 12 “Consumo e produção responsáveis” visa incentivar padrões sustentáveis de produção e consumo.

Com base nesses objetivos, a economia circular surge como uma alternativa ao modelo tradicional de produção linear (extrair, produzir, consumir, descartar), propondo, em seu lugar, um sistema baseado em ciclos produtivos que priorizam a reutilização, a reciclagem e o reaproveitamento de materiais. Costa *et al.* (2022), em um panorama da economia circular, apresentou resultados que comprovam que a escória de aciaria pode ser utilizada como agregados naturais sem causar prejuízos técnicos e com competitividade econômica-ambiental. Nesse sentido, estudos que demonstrem a eficiência de resíduos colaboram com a aplicação desse sistema.

A adoção de estratégias alinhadas aos princípios da economia circular contribui não apenas para a conservação ambiental, mas também para a redução de custos e para o aumento da eficiência dos processos produtivos. Nesse contexto, o presente trabalho busca analisar as propriedades da sucata KR e sua aplicabilidade como agregado na construção civil, visando uma alternativa funcional e que promova a sustentabilidade. Considerando, entretanto, que sua composição pode apresentar elementos potencialmente prejudiciais, como o enxofre, este estudo também abordará uma análise específica desse aspecto, avaliando possíveis limitações técnicas ou ambientais associadas ao seu uso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho mecânico e a estabilidade físico-química do pó de dessulfuração do ferro-gusa por Reator Kambara (sucata KR), considerando sua aplicação como substituto parcial e integral do agregado miúdo natural em argamassas.

2.2 Objetivos específicos

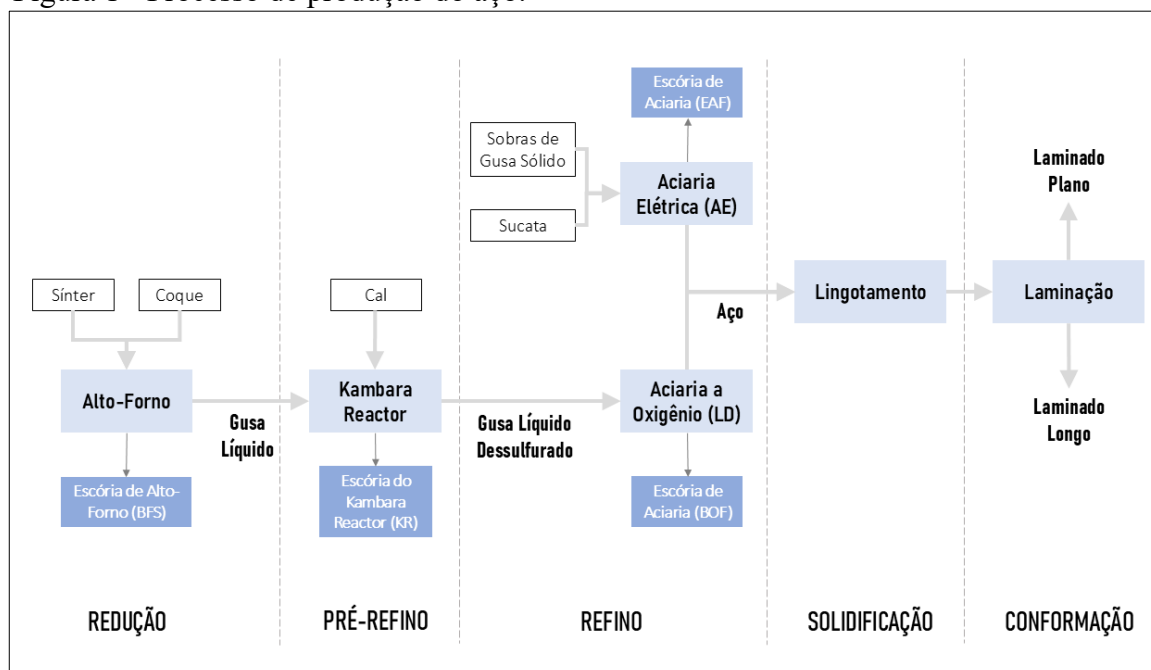
- Comparar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias produzidas com agregado natural e com sucata KR;
- Analisar os impactos da incorporação de sucata KR na trabalhabilidade da argamassa;
- Investigar a influência da sucata KR na estabilidade dimensional de compósitos cimentícios.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos Siderúrgicos

Com produção de 33,9 milhões de toneladas de aço em 2024, o Brasil é o maior produtor de aço da América Latina e ocupa a 9ª colocação no cenário global (IABR, 2025). No entanto, esse processo gera um volume significativo de resíduos: em média, são gerados 657 kg de coprodutos e resíduos para cada tonelada de aço bruto produzido (IABR, 2024). Isso significa que uma parcela considerável dos insumos é convertida em materiais secundários e resíduos, o que torna essencial a adoção de práticas eficazes pela indústria siderúrgica para a gestão e destinação adequada desses materiais. Para melhor compreender como o aço e seus coprodutos são gerados, o processo esquemático é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de produção do aço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tradicionalmente, existem duas rotas para a fabricação do aço: conversão por arco elétrico ou conversão por oxigênio, a última também conhecida como Linz-Donawitz (LD) (Matias *et al.*, 2022). Na rota do arco elétrico, as matérias-primas são o ferro-gusa sólido e a sucata. O processo começa na aciaria pela etapa de refino, realizada no forno a arco elétrico (EAF). Além das cargas metálicas, são adicionadas substâncias como a cal dolomítica para refinar o metal, removendo impurezas e carbono, com o objetivo de transformá-lo em aço de

alta pureza. Como nessa rota não se utiliza o minério de ferro como carga principal, pode-se dizer que é um processo de “reciclagem” do aço. Ao final desta etapa, são gerados o aço bruto e a escória de forno a arco elétrico (escória EAF). Em seguida, o aço líquido é moldado em lingotes, onde se solidifica, e posteriormente passa por processos de laminação que definirão o uso do material (IABR, 2023).

No processo de fabricação do aço por conversor a oxigênio, existem etapas que antecedem o refino. A produção se inicia na etapa de redução, em que são adicionados ao alto-forno coque, calcário e sinter — aglomerado formado por minério de ferro, cal e finos de coque (IABR, 2023). Como resultado dessa etapa, obtêm-se o ferro-gusa líquido e a escória de alto-forno (BFS). O gusa líquido, neste ponto, apresenta alto teor de enxofre, incorporado como um efeito colateral da utilização do coque. Com isso, ele pode passar por um processo que antecede o refino: a dessulfuração. Esse processo pode ocorrer de diferentes formas: por injeção de agentes dessulfurantes em painéis torpedo; por conversor a oxigênio; por adição de elementos dessulfurantes em sistemas de agitação do tipo Reator Kambara; entre outros (Oliveira Bridi, 2020). A dessulfuração antes da aciaria é um procedimento essencial para garantir maior eficiência no processo produtivo e menor custo do produto final, uma vez que remover o enxofre em etapas posteriores aumentaria os custos (Schrama *et al.*, 2017).

O método mais comum é a dessulfuração com o Reator Kambara. Nesse processo, utiliza-se um agitador mecânico para misturar o reagente dessulfurante (cal) ao gusa líquido, aumentando a velocidade da reação (Schrama *et al.*, 2017). A cal reage com o enxofre presente no gusa, formando compostos sulfurados, que se separam do metal e se concentram na superfície, originando a sucata KR. Após esse processo de pré-refino, o ferro-gusa dessulfurado passa para a etapa de refino. Na aciaria a oxigênio, adiciona-se cal dolomítica para eliminar impurezas, gerando como subproduto a escória do forno básico a oxigênio (BOF). Além disso, esta etapa é responsável por definir a quantidade de carbono presente na liga final, o que determina o tipo de aço produzido. Após essa etapa, o aço líquido passa para o processo de lingotamento contínuo, no qual é solidificado em semiacabados. Em seguida, segue para a conformação, assim como ocorre na aciaria a arco elétrico (Matias *et al.*, 2022; IABR, 2025).

Assim, os principais resíduos gerados pela indústria siderúrgica são as escórias: alto-forno, KR, EAF e BOF. A escória de alto-forno (BFS) é a que possui maior índice de reaproveitamento. Sua reutilização na indústria cimenteira é uma prática consolidada e normatizada pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Essa norma estabelece requisitos para a fabricação dos cimentos Portland e define o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) como um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer, escória granulada de alto-

forno e material carbonático. Para esse tipo de cimento, a norma permite uma elevada substituição do clínquer por escória granulada de alto-forno, podendo variar de 35% a 75%. Essa diretriz, além de viabilizar o aproveitamento de um coproduto da indústria siderúrgica, contribui para a redução do consumo de clínquer e, conseqüentemente, para as emissões de CO₂ associadas ao seu processo de produção.

A escória de aciaria é outro resíduo siderúrgico amplamente estudado, embora sua aplicação ainda seja limitada no mercado atual. Diversos estudos têm investigado o potencial de aproveitamento dessas escórias como materiais alternativos na produção de compósitos cimentícios. Costa *et al.* (2022) produziram concretos moldados in loco substituindo totalmente os agregados naturais por escória de aciaria (BOF), com o objetivo de avaliar sua viabilidade técnica, econômica e ambiental. Os resultados mostraram que o concreto com a escória BOF apresentou resistência à compressão até 156% superior aos 28 dias em comparação ao concreto convencional, além de permitir uma redução de 31% no consumo de cimento para a mesma classe de resistência. A escória não apresentou expansibilidade quando incorporada à matriz cimentícia, garantindo durabilidade. Esse desempenho está associado ao uso da escória previamente intemperizada — processo em que ocorrem modificações físico-químicas para estabilização do resíduo, incluindo a lixiviação de óxidos de cálcio, magnésio e sulfetos potencialmente reativos. Economicamente, o uso do resíduo reduziu os custos em até 36%, tornando o concreto mais acessível. O estudo concluiu que a aplicação da escória BOF em concretos moldados in loco é uma alternativa sustentável, alinhada aos princípios da economia circular.

O estudo de Chatzopoulos *et al.* (2021) investigou a viabilidade da substituição parcial (em 30% e 50%) de agregados convencionais por escórias EAF e de forno panela, etapa de refino secundária, na produção de concretos. Os resultados demonstraram que, além de não comprometer as características do material, a adição das escórias promoveu melhorias significativas. A resistência à compressão apresentou aumento de até 52%, além de uma melhora considerável nos indicadores de durabilidade. Os autores concluíram que a utilização desses agregados alternativos resultou em um concreto com maior resistência à penetração de cloretos, à carbonatação e aos ciclos de congelamento-descongelamento, estendendo a vida útil das estruturas.

Andrade *et al.* (2021) analisaram a viabilidade de substituição total de agregados convencionais por escórias de aciaria dos tipos BOF e EAF em concretos. O estudo avaliou o desempenho mecânico e a durabilidade, especificamente a resistência à carbonatação, em concretos de três classes de resistência, com e sem o uso de aditivo superplastificante. Os

resultados foram superiores para os concretos com escórias, que alcançaram resistências à compressão de 7% a 31% maiores e, também, demonstraram melhoria na durabilidade. A profundidade de carbonatação foi reduzida em comparação com os concretos de referência. Este desempenho é atribuído a uma matriz cimentícia mais densa e menos porosa. O estudo reforça a viabilidade técnica da aplicação de escórias como agregados na construção civil.

De modo geral, a escória de aciaria já foi investigada como concreto moldado in loco (Costa *et al.*, 2022), concreto de alto desempenho (Carvalho *et al.*, 2020), concreto compactado com rolo (Toffolo, 2015), argamassa (Martins *et al.*, 2024), bloco de pavimentação intertravado (Silva *et al.*, 2016), adição mineral (Carvalho *et al.*, 2023; Carvalho *et al.*, 2021) e aditivo dual (Carvalho *et al.*, 2024). A escória de aciaria também foi investigada quanto à sua durabilidade devido à ação de cloretos (Martins *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022), carbonatação (Andrade *et al.*, 2021) e outros agentes.

Por outro lado, a sucata KR é significativamente menos abordada na literatura. Uma busca por aplicações dessa escória no banco de dados Scopus resultou em apenas 40 trabalhos, utilizando a string de busca ("Kambara reactor slag" OR "KR slag" OR "desulfurization slag") AND (mortar OR concrete OR cement*). Em comparação, uma busca semelhante para escórias de aciaria ("steel slag" OR "basic oxygen furnace slag" OR "BOF slag" OR "electric arc furnace slag" OR "EAF slag") retornou 8.427 registros. Diante desse panorama e das especificidades da sucata KR, apresenta-se, a seguir, uma revisão específica sobre esse resíduo siderúrgico.

3.1.1 Sucata Kambara Reactor (KR)

De acordo com o estudo de Cho *et al.* (2018), a sucata KR é predominantemente composta por óxidos de cálcio (CaO), ferro (Fe₂O₃) e silício (SiO₂), que juntos representam mais de 84% de sua composição. A análise também identificou outros componentes significativos, como os óxidos de alumínio (Al₂O₃), magnésio (MgO) e enxofre (SO₃), o último responsável por 5,2% da composição. Esse teor é relativamente alto em comparação a outras escórias, e pode impactar diretamente a estabilidade das matrizes cimentícias que incorporam sucata KR (Ho *et al.*, 2017).

Alguns estudos têm investigado o uso da sucata KR como alternativa para reduzir os impactos ambientais associados à produção de cimento Portland. Costa *et al.* (2021) produziram pastas cimentícias a partir da ativação alcalina da sucata KR, utilizando soluções de silicato e hidróxido de sódio. Os resultados indicaram a formação de compostos como os géis C-S-H e C-(A)-S-H, fases reconhecidas por contribuírem para o ganho de resistência

mecânica do cimento. No entanto, os autores destacaram que mais pesquisas são necessárias para aprofundar o entendimento desse processo de ativação com o uso da sucata KR.

O estudo de Dieguez *et al.* (2019) explora o uso da sucata KR em composições cimentícias. Os autores investigaram a substituição parcial da escória granulada de alto-forno por sucata KR na formulação do cimento Portland. Os resultados indicaram que, embora a sucata KR tenha menor teor de SiO_2 , Al_2O_3 e MgO do que a de alto-forno, sua maior alcalinidade, relacionada ao elevado teor de Ca(OH)_2 , pode favorecer a ativação da escória granulada de alto-forno no processo de hidratação. A presença de Ca(OH)_2 e CaCO_3 em fases cristalinas, identificadas por difração de raios X e análise térmica, demonstrou a necessidade de um processo de moagem adequado para aumentar sua reatividade e viabilizar seu uso em cimentos do tipo CP III. Embora não tenha atingido os critérios de finura estabelecidos pelas normas quando utilizada isoladamente, os autores ressaltam que a sucata KR pode ser adicionada em até 30% da composição do cimento sem comprometer o desempenho do produto final.

Em um estudo relevante, Ho *et al.* (2017) avaliaram a incorporação da sucata KR em argamassas cimentícias, substituindo a areia natural em teores de até 40%. Os resultados indicaram que, embora a adição da escória tenha aumentado a fluidez da mistura, ela também prolongou o tempo de pega. Apesar de uma redução na resistência à compressão com o aumento do teor de escória, as argamassas demonstraram estabilidade volumétrica e desempenho satisfatório, validando o potencial de uso desse resíduo em materiais de construção.

Além do uso em matrizes cimentícias, a sucata KR também tem sido avaliada como agente estabilizante de solos. Bridi (2020) investigou a influência da sucata KR na estabilização de misturas de solo e observou que a presença de finos exerce papel determinante nesse processo, devido à maior área superficial e à reatividade química dessas frações. Os resultados apontaram que os mecanismos de estabilização com o uso da sucata KR ocorrem predominantemente por meio de reações químicas, como trocas catiônicas e reações de hidratação, e não apenas por modificações físicas, como a distribuição granulométrica e o empacotamento das partículas.

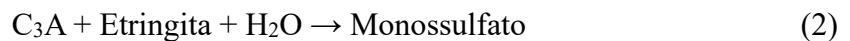
De acordo com esses estudos, a sucata KR apresenta elevado potencial de aplicação em materiais cimentícios e geotécnicos, seja como substituinte parcial em cimentos Portland, adição em argamassas ou como precursor em sistemas ativados alcalinamente. No entanto, sua utilização requer um entendimento aprofundado de suas reações químicas, da influência de elementos como o enxofre e das condições de incorporação para cada tipo de aplicação.

3.2 Ataques por Sulfatos

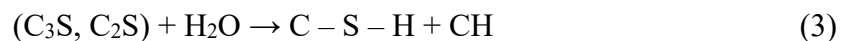
O ataque por sulfatos representa um dos principais mecanismos de deterioração em estruturas de concreto, levando à expansão, fissuração, perda de resistência e desintegração do concreto (Galan et al., 2019; Kanaan et al., 2022). Para compreender como esse processo se desenvolve, é essencial conhecer os produtos gerados durante a hidratação do cimento Portland que reagem com íons sulfato, provocando o efeito deletério.

3.2.1 Hidratação do Cimento Portland

O cimento Portland é composto por silicatos (C_3S e C_2S), aluminatos (C_3A e C_4AF) e sulfato de cálcio (gesso, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Mehta; Monteiro, 2008). A hidratação do cimento Portland ocorre em duas etapas principais: a hidratação dos aluminatos e a dos silicatos. Na primeira, o aluminato tricálcio (C_3A) e o gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) reagem com a água formando etringita (Equação 1). Essa reação é fundamental para evitar a pega instantânea do cimento Portland, permitindo um período de dormência. Esse processo está relacionado ao enrijecimento, pega e resistência inicial do cimento Portland (Neville, 2016). Contudo, a etringita é metaestável e tende a reagir novamente com C_3A e água, formando monossulfatos (Equação 2), que são mais estáveis que a etringita. Esse processo resulta em retração volumétrica, uma vez que a etringita ocupa volume significativamente maior do que os monossulfatos (Liu *et al.*, 2020).



Na hidratação dos silicatos, os compostos C_3S e C_2S reagem com a água formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência à compressão, preenchimento de poros e aglomeração de partículas, e o hidróxido de cálcio (CH) como subproduto (Equação 3) (Mehta; Monteiro, 2008; Neville, 2016).



3.2.2 Mecanismos do Ataque por Sulfatos

O ataque por sulfatos pode ocorrer de duas formas principais na matriz cimentícia: externo ou interno. O ataque externo, mais recorrente, envolve a difusão de íons sulfato do meio externo para o interior do concreto, onde reagem com os compostos hidratados da pasta endurecida (Costa *et al.*, 2018). As fontes mais comuns incluem esgoto, solos fertilizados ou com elevada decomposição de matéria orgânica. Condições como alta permeabilidade, umidade constante e elevada concentração de sulfatos favorecem esse tipo de ataque (Collepardi, 2003).

O ataque interno por sulfatos, embora menos recorrente, ocorre quando os sulfatos já estão presentes nos agregados do concreto ou quando há contaminação no processo produtivo. Essa forma de ataque químico não depende da penetração de agentes agressivos do meio ambiente, pois esses agentes já estão incorporados à matriz cimentícia desde a etapa de mistura (Colman *et al.*, 2021). A liberação dos íons sulfato internos pode ocorrer de forma gradual, sendo acelerada por fatores como variações de temperatura, umidade e características físico-químicas dos materiais, como alta alcalinidade e baixa porosidade (Colman *et al.*, 2021). Essas condições favorecem reações expansivas, gerando tensões internas, fissuras e degradação das propriedades mecânicas. Uma manifestação específica desse mecanismo é a Formação de Etringita Tardia (DEF), que se desenvolve quando concretos são expostos a elevadas temperaturas durante a cura inicial (Godart, 2017).

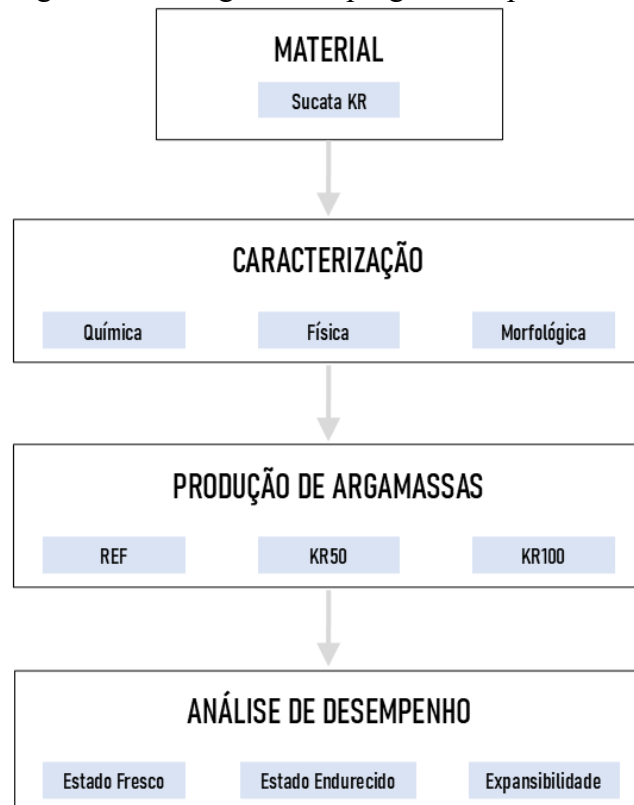
De acordo com Neville (2004), o ataque por sulfatos inicia-se com reações químicas na matriz cimentícia que, com o passar do tempo, evoluem para danos físicos visíveis, como fissuras, expansão e descamação. Os íons sulfatos podem vir acompanhados de cátions Ca, Na ou Mg, existindo pequenas distinções entre a forma como o ataque químico ocorre para cada agente agressivo específico. De modo geral, pode-se observar que essas reações envolvem a interação entre íons sulfato e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resultando na formação de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A gipsita, por sua vez, pode reagir com o aluminato tricálcico (C_3A) na presença de água, promovendo a formação secundária de etringita. Santhanam *et al.* (2003) observam que, à medida que as reações avançam, a pasta endurecida sofre expansão volumétrica e consequente redução de resistência mecânica.

Uma das formas mais agressivas de ataque por sulfatos é pelo MgSO_4 , visto que as fissuras formadas criam condições favoráveis à descalcificação do C-S-H, que se converte em M-S-H (Santhanam *et al.*, 2003). Segundo Skalny *et al.* (2002), o produto resultante da descalcificação é friável e não possui poder aglomerante, levando à perda de propriedades cimentícias, como coesão, aderência e resistência.

4 METODOLOGIA

Com o objetivo de compreender os efeitos da substituição parcial e total da areia natural por sucata KR nas argamassas, foi estruturado um programa experimental dividido em três etapas principais: caracterização do material, produção das misturas e avaliação do desempenho das argamassas. O esquema geral do programa é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental.



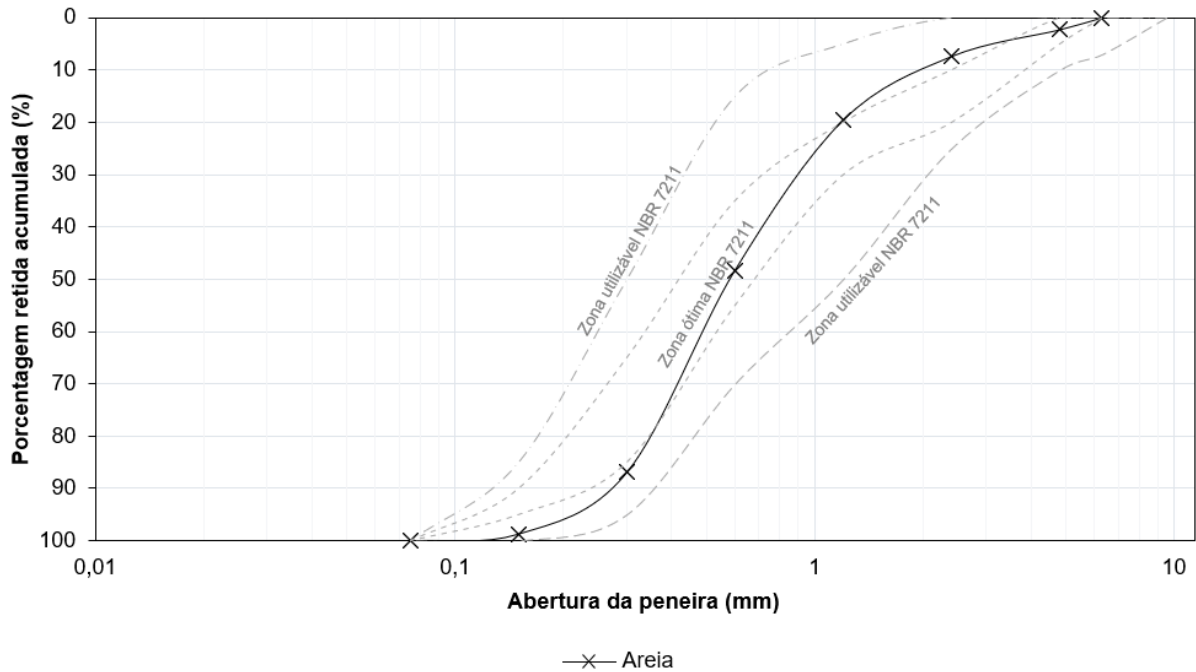
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.1 Materiais

Para produção das argamassas, foi utilizado o cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI). Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), esse cimento possui baixo teor de substituição do clínquer por outros componentes, o que motivou sua escolha. Essa característica permite avaliar com mais clareza os efeitos da sucata KR, minimizando interferências de materiais cimentícios complementares. Foi utilizada água potável fornecida pela CAGECE, companhia que abastece a região. O agregado miúdo natural empregado foi uma areia de rio, quartzosa, proveniente de Russas/CE, lavada com Diâmetro Máximo

Característico (DMC) de 4,75 mm, massa específica de 2,617 g/cm³, massa unitária de 1,564 g/cm³ e módulo de finura de 2,63. Sua granulometria é mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A sucata KR utilizada foi fornecida pela indústria siderúrgica ArcelorMittal, do tipo Linz-Donawitz (LD), localizada no Porto de Pecém. A Figura 4 mostra como a sucata KR é recebida, sem qualquer beneficiamento. Seu DMC de recebimento foi de 9,5 mm.

Figura 4 - Sucata KR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 Caracterização da Sucata KR

Para conhecer a sucata KR, foram realizadas caracterizações químicas, físicas e morfológicas. A identificação da composição química consistiu no emprego da técnica de Fluorescência de Raios X com o equipamento PANalytical Epsilon. O material utilizado precisou ser previamente preparado para se adequar às condições de realização do ensaio. A sucata KR foi cominuída com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana até que toda a massa necessária para o ensaio fosse passante na peneira de 75 μm . Além disso, foi realizado o ensaio de perda ao fogo até 1000 °C.

Para a caracterização física foram realizados ensaios de granulometria (ABNT NBR 17054, 2022), massa específica (ABNT NBR 16916, 2021) e massa unitária (ABNT NBR 16972, 2021). Como foi observada uma grande quantidade de finos na sua composição, também foi aplicada a técnica de granulometria a laser com meio de dispersão em água, o que permitiu completar a curva granulométrica.

Considerando a composição química rica em enxofre da sucata KR e seu alto teor de finos visíveis, foi realizada a análise morfológica utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com microscópio TESCAN – Vega XMU. Esse ensaio foi realizado para verificar a forma das partículas e a possível presença de aglomerados. A preparação da amostra consistiu na separação da fração passante na peneira de 300 μm . Essa mesma amostra foi utilizada para a identificação da composição química pontual por meio da espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) acoplada ao MEV.

4.3 Produção das Argamassas

Foram produzidas argamassas com traço 1:3, utilizando substituições em massa unitária da areia por sucata KR nas porções de 50% (KR50) e 100% (KR100). Como forma de comparação, também foi produzida uma argamassa de referência (REF), com utilização apenas do agregado natural. A produção das argamassas foi realizada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2025) adaptada. A Tabela 1 resume os traços realizados.

Tabela 1 - Traços das argamassas produzidas.

Identificação	Cimento	Areia	Sucata KR
REF	1	3	0
KR50	1	1,5	1,5
KR100	1	0	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Durante a produção das argamassas, o teor de água foi ajustado para obter uma trabalhabilidade equivalente entre as misturas. Para isso, foi realizado o ensaio de índice de consistência de acordo com o Anexo A da NBR 7215 (ABNT, 2025) adaptada, com o objetivo de obter espalhamento padrão de (165 ± 5) mm de diâmetro.

4.4 Avaliação de Desempenho

No estado endurecido, foi realizado ensaio à compressão aos 7 dias, utilizando uma Máquina Universal de Ensaio, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2025) adaptada. O objetivo foi determinar e comparar a resistência das argamassas. Os corpos de prova utilizados foram moldados em formato cúbico ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$), a fim de garantir uniformidade na aplicação da carga.

Para a avaliação da expansibilidade, foi realizado um ensaio acelerado de exposição hidrotérmica, inspirado na norma ASTM C1260 (2014), porém com adaptações importantes, uma vez que não foi utilizada solução de hidróxido de sódio (NaOH) e o objetivo não era avaliar reação álcali-agregado (RAA). O objetivo deste estudo foi submeter as argamassas a condições aceleradas de degradação, caracterizadas por alta temperatura e presença contínua de água, a fim de potencializar eventuais efeitos expansivos. Os corpos de prova utilizados apresentavam formato prismático, com dimensões de $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$. Essas barras de argamassa foram imersas em um equipamento de banho-maria mantido a 80°C , caracterizando um ambiente hidrotérmico controlado. O ensaio teve duração total de 28 dias, sendo realizadas medições de comprimento nos dias 1, 2, 3, 4, 5, 7, 16 e 28, a partir do início da imersão.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização Química

A composição química da sucata KR é apresentada na Tabela 2. Observa-se que os principais elementos identificados são cálcio (Ca), carbono (C), silício (Si) e enxofre (S). Os elevados teores de Ca e C indicam uma composição mineralógica rica em carbonato de cálcio, com presença também de silicatos de cálcio e, possivelmente, sulfato de cálcio.

Tabela 2 - Composição química da sucata KR obtida através do FRX.

Componente	Sucata KR (%)
CaO	58,59
Fe ₂ O ₃	2,54
SiO ₂	7,69
MgO	2,03
MnO	0,18
Al ₂ O ₃	1,71
CO ₂ (perda ao fogo)	20,25
TiO	0,12
SO ₃	6,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na literatura (Martins *et al.*, 2021), resultados mostram que os resíduos siderúrgicos mais estudados possuem baixa quantidade de enxofre em suas composições, como é o caso da escória de alto-forno (1,0-1,6%), da escória EAF (0,42-0,65%) e da escória BOF (0,07-0,71%). A sucata KR se diferencia desses resíduos, pois possui uma taxa de enxofre significativamente superior, como observado na Tabela 2. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), a quantidade máxima de enxofre que se pode ter na composição do cimento é de 4,5%. Portanto, o uso da sucata KR em matrizes cimentícias, por mais que utilizada como agregado, torna-se uma preocupação, tendo em vista a relevante presença de enxofre neste material. Esse anseio é causado por possíveis reações deste componente com o cimento, podendo causar retardo de pega ou futuro ataque de sulfato interno.

Além da composição química obtida com o FRX, a análise de raio x por EDS acoplada ao MEV forneceu os elementos químicos presentes na amostra. Os valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química da sucata KR obtida através do MEV/EDS.

Elemento	Sucata KR (%)
O	43,83
Al	0,96
Si	2,62
Fe	2,15
S	4,9
C	1,2
Ca	43,34
Mg	0,99

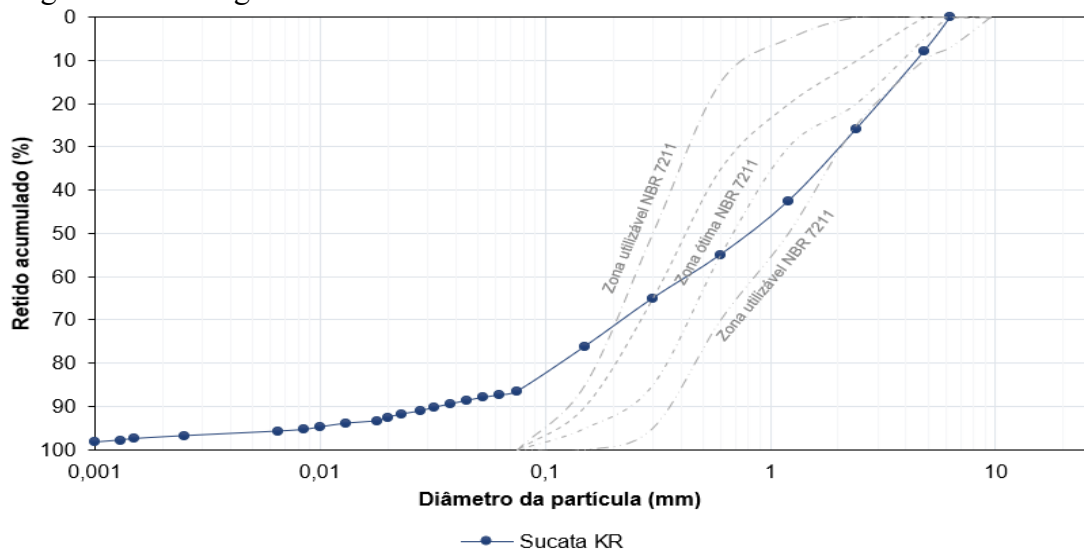
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que a composição da sucata KR obtida por EDS/MEV aproximou-se da composição determinada por FRX, o que confirma a coerência entre os métodos utilizados. Além disso, trabalhos anteriores relataram composições químicas semelhantes para a sucata KR (Pires *et al.*, 2019; Cho *et al.*, 2018; Ho *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2021).

5.2 Caracterização Física

A distribuição granulométrica da sucata KR é apresentada na Figura 5. Observa-se que, em seu estado natural, a sucata KR apresenta uma curva granulométrica que não atende os limites da zona ótima estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022), sendo que parte de sua fração ainda se encontra fora da zona utilizável.

Figura 5 - Curva granulométrica da sucata KR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como pode ser observado, cerca de 13% do material apresentou partículas com tamanho inferior a 75 μm , indicando uma quantidade significativa de material fino presente. Esse alto teor de finos pode impactar a trabalhabilidade da mistura devido à ausência de partículas mais granulares que favoreçam o empacotamento adequado.

Com base na análise granulométrica, o DMC da sucata KR foi estabelecido em 9,5 mm. Embora nenhuma partícula com esse tamanho tenha sido identificada na amostra, esse valor foi adotado em conformidade com a NBR 7211 (ABNT, 2022), que determina que, quando a porcentagem retida em uma peneira ultrapassa 5%, deve-se considerar como DMC o diâmetro da peneira imediatamente superior.

A Tabela 4 apresenta as demais caracterizações físicas analisadas da sucata KR. Observa-se que a massa específica é aproximadamente 25% maior do que a da areia natural utilizada, enquanto a massa unitária é 35% menor. Essa diferença pode ser atribuída à alta densidade dos grãos da sucata KR, relacionada ao elevado teor de ferro em sua composição. Em relação ao módulo de finura, ele é relativamente semelhante ao da areia natural.

Tabela 4 - Características físicas da sucata KR.

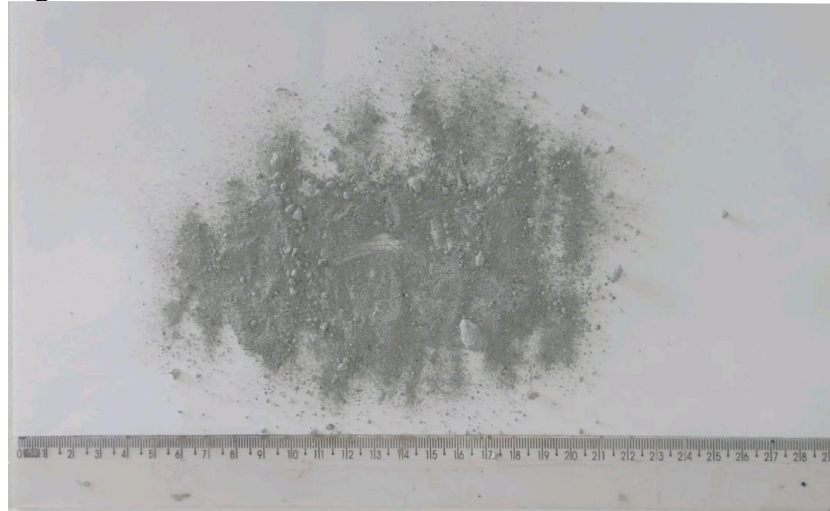
Propriedade	Sucata KR
Massa específica	3,28 g/cm ³
Massa unitária	1,16 g/cm ³
Módulo de finura	2,73
DMC	9,5 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 Caracterização Morfológica

A Figura 6 mostra a sucata KR em seu estado natural. Observa-se que ela possui uma grande quantidade de material fino, concordando com a granulometria.

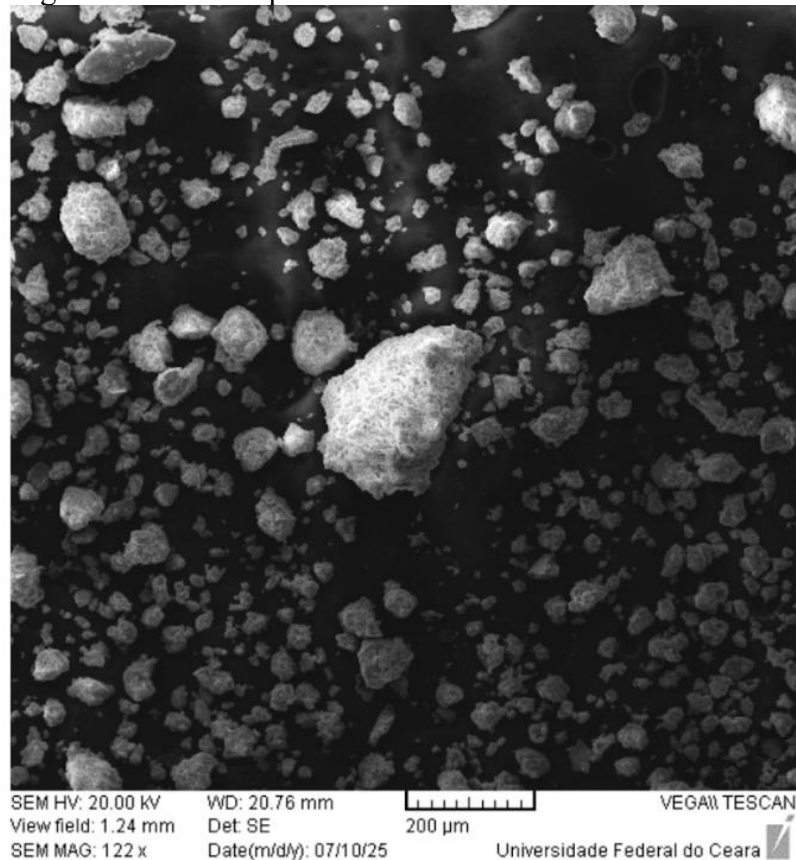
Figura 6 - Sucata KR *in natura*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O resultado da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é apresentado na Figura 7. Observa-se que as partículas apresentam morfologia angular, com formatos predominantemente cúbicos. De modo geral, não foram identificados aglomerados, indicando que os tamanhos observados correspondem às dimensões naturais das partículas.

Figura 7 - Microscopia eletrônica de varredura da sucata KR.

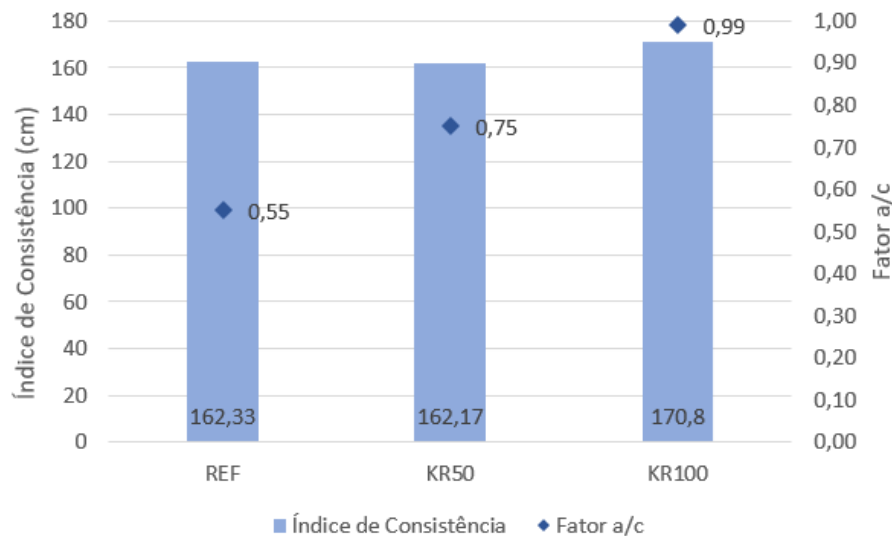


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.4 Estado Fresco

A Figura 8 apresenta o índice de consistência e o fator água/cimento (a/c) das misturas. O teor de água foi variado para obter trabalhabilidades equivalentes garantindo que as argamassas teriam mesma função e aplicações semelhantes dentro da normativa.

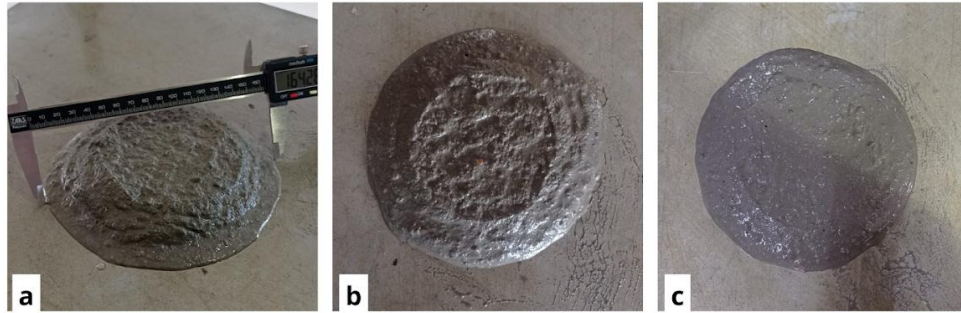
Figura 8 - Índice de consistência e fator água/cimento das argamassas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Acredita-se que o elevado teor de finos da sucata KR, conforme observado na granulometria (Figura 5), tenha influenciado significativamente o aumento do consumo de água das argamassas KR50 e KR100. Essa demanda está associada à elevada área superficial dos finos, o que pode ter levado à formação de uma estrutura com maior porosidade e, consequentemente, menor resistência mecânica. Por outro lado, notou-se maior coesão das argamassas, como pode ser observado na Figura 9. Essa característica pode ser vantajosa em aplicações que exigem maior aderência e estabilidade da mistura, como em revestimentos e rebocos, onde a resistência mecânica não é o principal requisito de desempenho, mas sim a trabalhabilidade, adesão e coesividade durante a aplicação.

Figura 9 - Espalhabilidade das argamassas (a) REF; (b) KR50; (c) KR100.



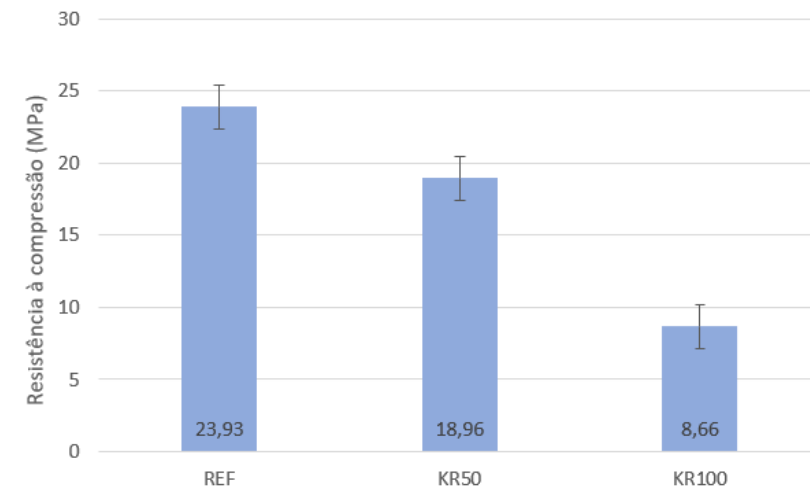
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Outro ponto relevante a se comentar, é que a NBR 7215 (ABNT, 2025) determina uma relação a/c de 0,48 para argamassas de referência. No entanto, durante a execução dos ensaios, observou-se que essa proporção não foi suficiente para atender ao índice de consistência exigido pelo Anexo A da mesma norma. Para garantir a trabalhabilidade adequada e conformidade com os parâmetros normativos, foi necessário ajustar a relação a/c da argamassa de referência para 0,55. Possíveis justificativas para esse comportamento incluem o uso de areia fora das especificações estabelecidas pela norma, bem como as condições climáticas desfavoráveis apresentadas no laboratório. A norma recomenda que os ensaios sejam realizados sob temperaturas de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, contudo, na realização dos ensaios, a temperatura era de aproximadamente 35°C , o que pode ter causado uma rápida evaporação da água. Além disso, a granulometria da areia, conforme apresentada anteriormente na Figura 3, apresenta teor insuficiente de partículas finas para posicioná-la na zona ótima especificada na norma. Essa carência de finos pode comprometer a coesão e a fluidez da matriz, exigindo um aumento da relação a/c para compensar a menor capacidade de empacotamento e lubrificação entre os grãos.

5.5 Estado Endurecido

A Figura 10 apresenta a resistência à compressão das argamassas produzidas. Como esperado, a quantidade de água influenciou na resistência à compressão. Destaca-se que os resultados tiveram baixo desvio padrão, indicando que a moldagem foi eficiente e os corpos de prova representativos.

Figura 10 - Média das resistências à compressão das argamassas.

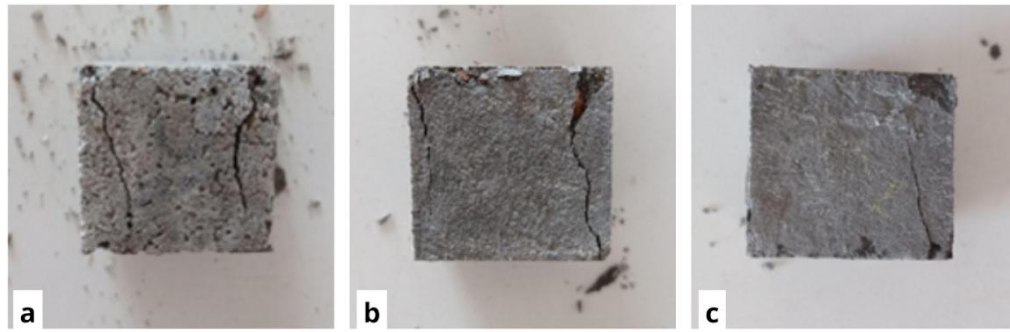


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme os resultados, a REF obteve a maior resistência, enquanto a KR50 apresentou uma redução moderada de aproximadamente 21%. Por outro lado, a KR100 apresentou uma maior queda de resistência, aproximadamente 64% em relação à referência. Essas reduções podem estar ligadas a múltiplos fatores. Primeiramente, a necessidade de um maior fator a/c para manter a consistência desejada pode ter levado ao aumento da porosidade da matriz endurecida, afetando diretamente a capacidade de resistir a esforços mecânicos. Além disso, a presença de elevado teor de finos e a granulometria irregular da sucata KR, observadas anteriormente, podem ter comprometido o empacotamento das partículas e a adesão entre pasta e agregado. Outros fatores, como impurezas residuais da sucata KR ou maior absorção de água, também podem ter interferido na hidratação do cimento e na formação da microestrutura.

A Figura 11 mostra os corpos de prova rompidos. Observa-se que a ruptura ocorreu conforme o comportamento esperado, pois, segundo Lamond e Pielert (2006), é comum que corpos de prova cúbicos apresentem fraturas nas faces laterais devido às tensões geradas durante a compressão. Esse tipo de ruptura indica que o ensaio ocorreu de forma esperada, sem interferências externas, como desnível de carga ou falhas de moldagem, que poderiam comprometer a confiabilidade do ensaio.

Figura 11 - Ruptura dos corpos de prova cúbicos (a) REF; (b) KR50; (c) KR100.

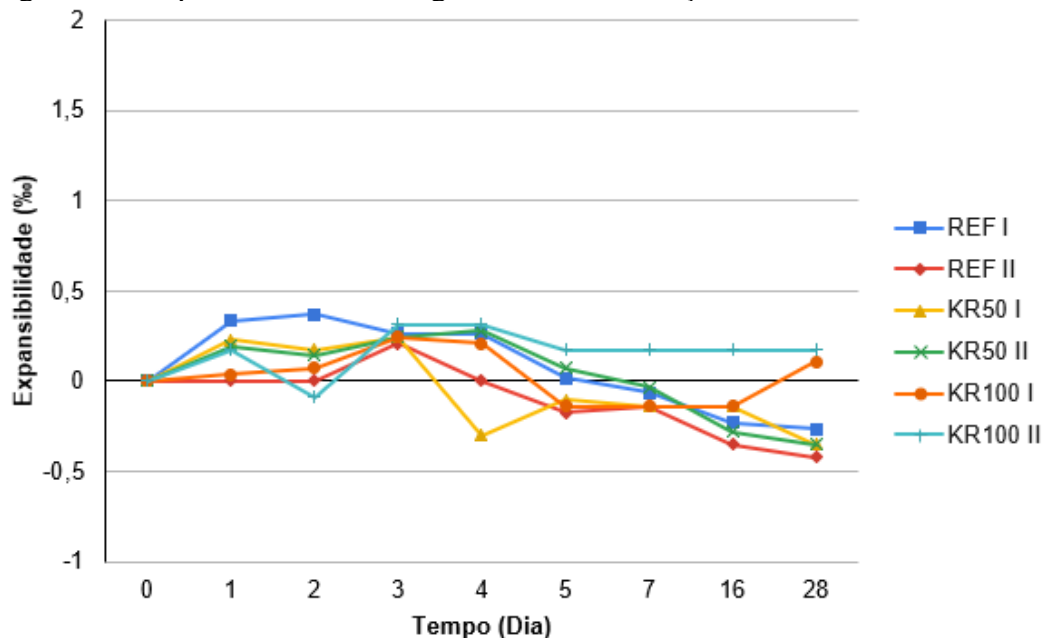


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.6 Análise de Expansibilidade

A análise de expansibilidade é mostrada na Figura 12. Observa-se que aconteceram retrações em praticamente todas as amostras. Isso pode estar diretamente ligado ao processo de hidratação do cimento Portland, como também pode estar relacionado a maior utilização de água, que pode ter aumentado a retração plástica.

Figura 12 - Expansibilidade das argamassas sob condições hidrotérmicas.



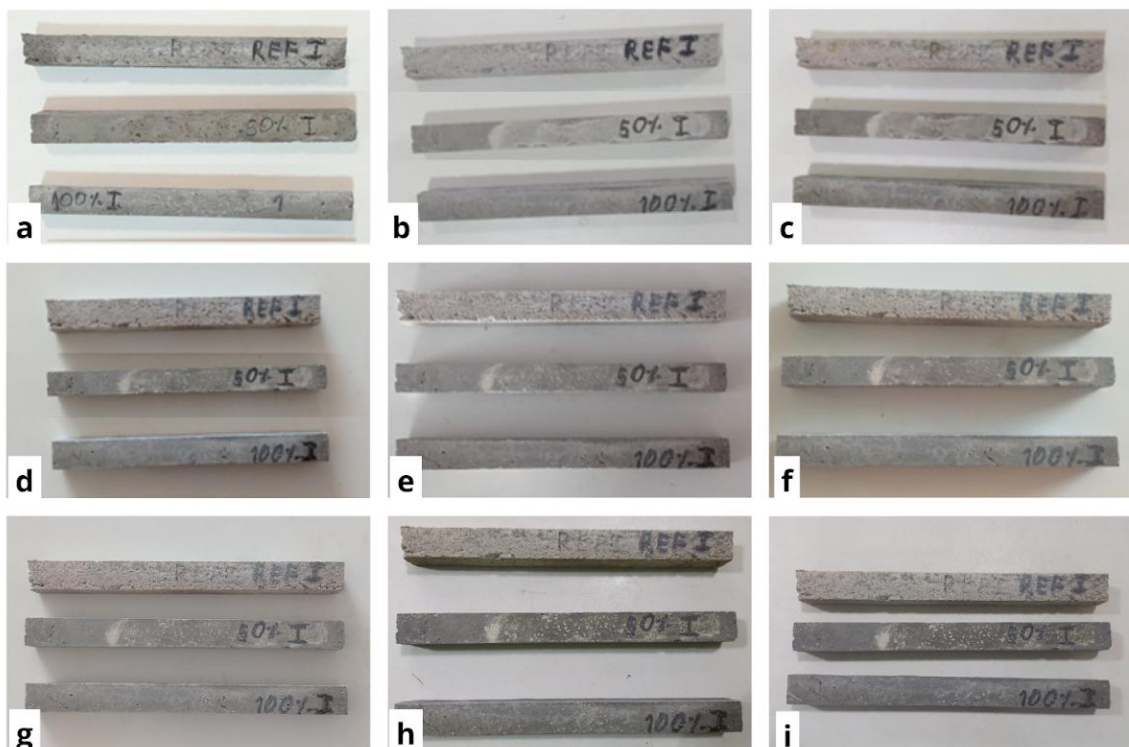
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De acordo com a norma ASTM C1260 (2014), corpos de prova que apresentarem expansibilidade inferior a 0,1 % (ou 1‰) após 16 dias, são considerados como “inócuos”, ou seja, não apresentam efeitos prejudiciais. Como foi observado, nenhum corpo de prova ultrapassou 0,5‰ de expansibilidade. Portanto, pode-se concluir que o material apresentou boa

estabilidade. Apesar da composição química com teores maiores que o usual de S, esse componente provavelmente encontra-se em fases estáveis e não, aparentemente, teve nenhum tipo de reação deletéria estimulada pelo ambiente desfavorável (alta umidade e temperatura).

A Figura 13 mostra a aparência dos corpos de prova nos dias de medições. Observa-se que todos os corpos de prova se encontram íntegros ao fim do período de ensaio. Algumas manchas esbranquiçadas apareceram nas argamassas com presença de areia de rio, tanto na argamassa REF quanto na argamassa KR50, podendo indicar a presença de algum componente não usual. No entanto, cabe reforçar que não foram observadas fissuras ou desintegração aparente das argamassas durante o período do ensaio.

Figura 13 - Argamassas nos dias (a) 0; (b) 1; (c) 2; (d) 3; (e) 4; (f) 5; (g) 7; (h) 16; (i) 28.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6 CONCLUSÃO

A substituição da areia pela sucata KR impactou negativamente a trabalhabilidade das argamassas, exigindo um aumento no teor de água para atingir valores de consistência semelhantes à referência. Esse ajuste contribuiu para a redução da resistência mecânica, especialmente na formulação com 100% de substituição (KR100), que apresentou desempenho significativamente inferior. Por outro lado, a mistura com 50% (KR50) manteve resultados mais equilibrados, indicando potencial de uso em aplicações não estruturais.

A estabilidade dimensional, por sua vez, foi um fator positivo. Diante das condições de agressividade impostas, as argamassas não apresentaram variações significativas de comprimento. Além disso, não foram observados sinais graves de ataque de sulfato. Ainda, o material não apresentou fissuras ou desintegrações. No entanto, ensaios com maiores durações são recomendados para garantir durabilidade. Além disso, recomenda-se uma análise morfológica dessas argamassas após a situação agressiva.

Com base nos resultados de resistência mecânica, e considerando a proposta de reutilização do resíduo na construção civil, uma alternativa viável seria sua aplicação em situações nas quais a resistência mecânica não seja o requisito principal. Conforme verificado, as argamassas com substituição da areia por sucata KR apresentaram maior coesão, o que indica potencial para uso em revestimentos. Nessa aplicação, além da menor exigência estrutural, os efeitos de um eventual ataque por sulfatos seriam menos prejudiciais, uma vez que os revestimentos atuam como elementos não estruturais.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados e conceitos abordados ao longo deste trabalho podem ser expandidos para novas oportunidades e/ou suprir adequações metodológicas necessárias devido às características observadas da sucata KR. Algumas propostas para trabalhos futuros são:

- Avaliar argamassas de sucata KR produzidas com aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, buscando adequação de trabalhabilidade sem aumentar a relação a/c;
- Investigar a adequação (beneficiamento) da sucata KR aos limites de zona ótima previstos em norma, objetivando menor relação a/c por meio de um teor de finos mais adequado;

- Analisar a possibilidade de moagem da sucata KR para uso como adição, uma vez que ela apresentou sinais de melhoramento de coesão e por já ser um material, em grande parte, fino;
- Realizar os ensaios normativos relacionados a argamassas de revestimento, utilizando substituição por sucata KR, a fim de avaliar aplicações dela com esse objetivo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Humberto Dias *et al.* Mechanical performance and resistance to carbonation of steel slag reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 298, 123910, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123910>.
- ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. Mercado. São Paulo: ANEPAC, 2022. Disponível em: <https://anepac.org.br/mercado/> . Acesso em: 3 jul. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276: 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: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16916: agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16972: agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17054: agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.
- ASTM. ASTM C1260 – 14: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken: ASTM International, 2014. 5 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C1260-14>.
- CARVALHO, J. M. F. de *et al.* Enhancing the eco efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, p. 123–134, 2020.
- CARVALHO, J. M. F. de *et al.* Influence of particle size designed recycled mineral admixtures on the properties of cement based composites. *Construction and Building Materials*, v. 272, p. 121640, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121640
- CARVALHO, V. R. *et al.* Performance of low energy steel slag powders as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.xxx.

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.

CHATZOPOULOS, Alexandros; SIDERIS, Kosmas K.; TASSOS, Christos. Production of concretes using slag aggregates: Contribution of increasing the durability and sustainability of constructions. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, e00711, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00711>.

CHO, Bong-Suk; KOO, Kyung-Mo; CHOI, Se-Jin. Compressive strength and microstructure properties of alkali-activated systems with blast furnace slag, desulfurization slag, and gypsum. *Advances in Civil Engineering*, [S.l.], v. 2018, Article ID 6123070, 9 p., 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/6123070>.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement & Concrete Composites*, v. 25, n. 4-5, p. 401-407, abr./maio 2003.

COLMAN, C. *et al.* Internal sulfate attack in mortars containing contaminated fine recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 289, 2021, artigo 123100, 10 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123100>.

COSTA, H. N.; NOBERTO, C. C.; ALMEIDA, L. A.; NOGUEIRA, R. E. F. Q.; CABRAL, A. E. B. Alkaline activation of cement pastes with desulfurization slag. *Cerâmica*, São Paulo, v. 67, p. 399–405, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132021673843090>.

COSTA, L. C. B. *et al.* Eco-efficient steel slag concretes: an alternative to achieve circular economy. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 2, e15201, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000200001>.

COSTA, Laís Cristina Barbosa. Desempenho de concretos de escória de aciaria frente a ataque de cloretos. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

COSTA, Laís Cristina Barbosa *et al.* Sodium sulfate attack on Portland cement structures: experimental and analytical approach. *REM, International Engineering Journal*, Ouro Preto, v. 71, n. 4, p. 531-542, out./dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672018710009>.

DIEGUEZ, Ana Carolina de Oliveira *et al.* Comparison of Kambara reactor slag with blast furnace slag for Portland cement industry applications. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 3, p. 2786-2795, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.030.

GALAN, I.; BALDERMANN, A.; KUSTERLE, W.; DIETZEL, M.; MITTERMAYR, F. Durability of shotcrete for underground support – Review and update. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 465–493, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151

GODART, B. Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation. *Structural Engineering International*, v. 27, n. 3, p. 362-369, ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2749/101686617X14881932436771>.

HO, C.-L.; Huang, W.-L.; Wang, H.-Y. Study of the volume stability of slag cement mortar applied to desulfurization slag during high temperature operation. *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 144, p. 147–157, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.085.

IABR – Instituto Aço Brasil. Aço & Sustentabilidade: folder institucional 2024. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2024. Disponível em: https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/08/Folder_AcoBrasil_Sustentabilidade_2024.pdf. Acesso em: 3 jul. 2025.

IABR – Instituto Aço Brasil. Mini anuário 2025: dados da indústria do aço no Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025.

IABR – Instituto Aço Brasil. Processo siderúrgico. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KANAAN, Dima; SOLIMAN, Ahmed M.; SULEIMAN, Ahmed R. Zero Cement Concrete Resistance to External Sulfate Attack: A Critical Review and Future Needs. *Sustainability*, v. 14, n. 4, artigo 2078, fev. 2022. DOI: 10.3390/su14042078

LAMOND, J. F.; PIELERT, J. H. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. [S.l.]: ASTM International, 2006. Disponível em: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/66539/1/1499.pdf>.

LIU, Peng; CHEN, Ying; YU, Zhiwu; CHEN, Lingkun; ZHENG, Yongfeng. Research on sulfate attack mechanism of cement concrete based on chemical thermodynamics. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, Article ID 6916039, 16 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/6916039>.

MARTINS, A. C.; SOUSA, A. M.; COSTA, L. C. B.; *et al.* Steel slags in cement based composites: an ultimate review. *Construction and Building Materials*, v. 296, p. 123820, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123820

MARTINS, L. M.; MARQUES, K. M.; ELÓI, F. P. d. *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, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01897-8>.

MATIAS, Ana Carolina de Paula *et al.* Escória de aciaria para construção sustentável. In: PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti; BARBOSA, Maria Teresa Gomes (Org.). *Ambiente construído: cidades resilientes e sua sustentabilidade*. 1. ed. Ouro Preto: Editora UFOP, 2022. cap. 4, p. 83–101.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEGUETE, Dayanne Severiano. Estabilização “físico-química” de resíduo sulfetado/sulfatado com incorporação de escória de dessulfuração. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 8, p. 1275-1296, ago. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>.

OLIVEIRA BRIDI, Lucas. Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos. 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: ONU Brasil, 2025. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 6 jul. 2025.

PIRES, Patrício Moreira; TEIXEIRA, Jamilla Emi Sudo Lutif; NEPOMUCENO, Daiana Valt; FURIERI, Elaine Cristina. Laboratory and field evaluation of KR slag–stabilized soil for paving applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 9, p. 04019182, set. 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002811](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002811).

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Sulfate attack mechanisms: Part II. The role of mineral admixtures in mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 3, p. 325-332, mar. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00958-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00958-4).

SCHRAMA, F. N. H.; BEUNDER, E. M.; VAN DEN BERG, B.; YANG, Y.; BOOM, R. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 44, n. 5, p. 333–343, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>.

SILVA, M. J. da; DE SOUZA, B. P.; MENDES, J. C.; BRIGOLINI, G. J. S.; SILVA, S. N.; PEIXOTO, R. A. F. Feasibility study of steel slag aggregates in precast concrete pavers. *ACI Materials Journal*, v. 113, n. 4, p. 439–446, jul./ago. 2016. DOI: 10.14359/51688986.

SKALNY, Jan; MARCHAND, Jacques; ODLER, Ivan. Sulfate Attack on Concrete. London: Spon Press (Taylor & Francis Group), 2002. Capítulo de livro ou relatório, 67 p. Disponível em: “Sulfate Attack on Concrete”, NDI EthERNet.

TOFFOLO, Rodrigo Vicente Machado. Pavimentos sustentáveis. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.