

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

NATHÁLIA VANDERLEI BONIFÁCIO

**AVALIAÇÃO DO USO DE DIFERENTES LOTES DE PÓ DE
DESPOEIRAMENTO DO BASCULAMENTO DE ESCÓRIA KR COMO
UM MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

VITÓRIA
2024

NATHÁLIA VANDERLEI BONIFÁCIO

**AVALIAÇÃO DO USO DE DIFERENTES LOTES DE PÓ DE
DESPOEIRAMENTO DO BASCULAMENTO DE ESCÓRIA KR COMO
UM MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Civil do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Pilar

VITÓRIA

2024

NATHÁLIA VANDERLEI BONIFÁCIO

**AVALIAÇÃO DO USO DE DIFERENTES LOTES DE PÓ DE DESPOEIRAMENTO
DO BASCULAMENTO DE ESCÓRIA KR COMO UM MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Orientador – UFES

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Examinador Interno – UFES

Eng. Me. Carlos Magno Sossai Andrade
Examinador Externo – ArcelorMittal

Vitória – ES, 10 de Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado ao longo de todos esses anos e por não me deixar desaninar. Agradeço também ao meu anjo da guarda, minha avó Ana (*in memoriam*), que certamente continua intercedendo a Deus pela minha vida.

À minha família, especialmente aos meus pais, Geferson e Lucia, pelo apoio incondicional que me permitiu dedicar-me à Universidade e por sempre acreditarem na educação como uma poderosa ferramenta de transformação, mesmo diante das adversidades. À minha irmã, Izadora, por sempre esperar o melhor de mim. Espero um dia poder recompensar tudo o que vocês fizeram e fazem por mim.

Ao meu namorado, João Victor, que esteve sempre ao meu lado, cujo apoio, amor e compreensão no dia a dia foram essenciais para que eu pudesse me dedicar à realização deste trabalho. Obrigada por sempre acreditar em mim e por ser meu parceiro de vida.

Às minhas amigas de longa data e àquelas que encontrei na Universidade, por todo o incentivo, por dividirem tantos momentos comigo e por compreenderem as minhas ausências.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo Pilar, meus sinceros agradecimentos por acreditar no potencial desta pesquisa e na minha capacidade de realizar um bom trabalho. Suas orientações e valiosos ensinamentos foram fundamentais ao longo desta jornada.

Aos técnicos do LEMAC, Luana, Henrique e Márcio, que não mediram esforços para me ajudar e, por vezes, excederam seus horários de expediente para me apoiar na realização dos ensaios da minha pesquisa, meu muito obrigada. Sem o apoio de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Por fim, à ArcelorMittal Tubarão, especialmente ao Carlos Magno, por todo apoio durante a pesquisa e por possibilitar o fornecimento das amostras utilizadas.

RESUMO

Estudos recentes revelam a viabilidade da utilização da escória do reator Kambara (KR), um coproducto da indústria siderúrgica, como ativador alcalino da escória granulada de alto-forno (EGAF). Durante o processo de basculamento em pátios de beneficiamento, partículas finas da escória KR, em suspensão no ar, são captadas por um sistema de despoeiramento, dando origem ao pó de despoeiramento do basculamento de escória KR (KRP). O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do uso do KRP como material cimentício suplementar. Para isso, foram coletados cinco lotes deste material ao longo de um semestre. Cada amostra foi submetida a ensaios de granulometria por peneiramento, massa específica, superfície específica pelo método de Blaine, perda ao fogo e resíduo insolúvel. Com o objetivo de avaliar se o KRP pode atuar como material cimentício suplementar na produção de cimentos compostos, foram produzidos em laboratório dois cimentos de referência. O primeiro continha 65% de CP V ARI e 35% EGAF e o segundo continha 25% de CP V e 75% EGAF, ambas as proporções em massa. Para cada um dos cimentos de referência, foi incorporado 15% de KRP em substituição à EGAF, em massa, para cada um dos lotes de KRP caracterizado. Para avaliar o desempenho mecânico dessas composições cimentícias, foram produzidas argamassas e rompidos corpos de prova aos 3, 7, 28 e 91 dias de hidratação. Os valores de resistências à compressão desses cimentos foram determinados e comparados com os resultados dos cimentos de referência, sem adição do KRP. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os cimentos compostos com escória granulada de alto-forno e KRP apresentaram desempenho mecânico similar ao da referência aos 3 e 7 dias, enquanto aos 28 dias apenas um dos lotes avaliados teve resultado equivalente. Aos 91 dias, os cimentos com KRP alcançaram de 91% a 102% da resistência do cimento de referência, o que evidenciou a contribuição do material para o desenvolvimento de resistência à compressão. Por outro lado, os cimentos Portland de alto-forno com KRP indicaram resistência inferior à referência em todas as idades avaliadas, com redução de resistência de até 37%, 26%, 34% e 29%, aos 3, 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Assim, o KRP surge como uma alternativa viável de adição para a produção de cimento composto com escória granulada de alto-forno.

Palavras-chave: escória KR; pó de despoeiramento; cimento Portland; material cimentício suplementar; resistência à compressão.

ABSTRACT

Recent studies reveal the feasibility of using Kambara reactor (KR) slag, a by-product of the steel industry, as an alkaline activator for ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). During the dumping process in beneficiation yards, fine particles of KR slag suspended in the air are captured by a dust removal system, resulting in KR slag dumping dust powder (KRP). The aim of this work was to evaluate the potential use of KRP as a supplementary cementitious material. For this purpose, five samples of this material were collected over a semester. Each sample underwent to tests for particle size distribution by sieving, specific gravity, Blaine fineness, loss on ignition, and insoluble residue. In order to evaluate whether KRP can act as a supplementary cementitious material in the production of blended cements, two reference cements were produced in the laboratory. The first contained 65% CP V ARI and 35% GGBFS, while the second consisted of 25% CP V and 75% GGBFS, with both proportions in mass. For each reference cement, 15% of KRP was incorporated as a replacement for GGBFS, by mass, for each of the characterized KRP samples. To evaluate the mechanical performance of these cementitious compositions, mortars were produced and specimens were broken at 3, 7, 28, and 91 days of curing. The compressive strength values of these cements were determined and compared with the results of the reference cements without KRP addition. From the results obtained, it was found that the cements composed of ground granulated blast-furnace slag with KRP showed similar mechanical performance to the reference at 3 and 7 days, while at 28 days only one of the evaluated samples had an equivalent result. At 91 days, the cements with KRP achieved up to 91% to 102% of the reference cement's strength, highlighting the material's contribution to the development of compressive strength. On the other hand, Portland blast-furnace cements with KRP indicated lower strength than the reference at all evaluated ages, with strength reductions of up to 37%, 26%, 34%, and 29% at 3, 7, 28, and 91 days, respectively. Thus, KRP emerges as a viable addition for the production of blended cement with ground granulated blast-furnace slag.

Palavras-chave: KR slag; dust removal powder; Portland cement; supplementary cementitious material; compressive strength.

LISTA DE ABREVIAÇÕES

AMT – ArcelorMittal

CNI – Confederação Nacional de Indústria

CP – cimento Portland

CPs – corpos de prova

DRX – Difração de Raios-X

EGAF – escória granulada de alto-forno

IAB – Instituto Aço Brasil

IEA – *International Energy Agency*

KR – *Kambara Reactor*

KRP – pó de despoeiramento do basculamento de escória KR e gusa de emergência

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

SCM – *supplementary cementitious materials*

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de produção do aço.....	16
Figura 2 – Esquema de dessulfuração do reator Kambara.....	19
Figura 3 – DRX da escória KR.....	22
Figura 4 – DRX e imagem de MEV da escória KR.....	22
Figura 5 – Filtro de mangas do sistema de despoieiramento de basculamento de escória KR e gusa em emergência da AMT Tubarão.....	23
Figura 6 – Esquema ilustrativo do sistema de despoieiramento dos processos de basculamento de escória KR e basculamento de gusa em emergência da AMT Tubarão.....	24
Figura 7 – MEV dos concretos OPC e GKGB, aos 7 e 91 dias.....	30
Figura 8 – Resistência à compressão das argamassas contendo EGAF e escória KR.....	31
Figura 9 – Resistência à compressão das argamassas contendo EGAF, escória KR e gesso.....	32
Figura 10 – DRX das argamassas O100, O50B50, B80D20 e B75D10G15.....	33
Figura 11 – CPV ARI utilizado na pesquisa.....	34
Figura 12 – Aspecto visual dos lotes de KRP.....	36
Figura 13 – Amostra da EGAF utilizada na pesquisa.....	36
Figura 14 – Processo de queima da areia na mufla.....	37
Figura 15 – Aspecto visual da areia. (a) Antes da queima; (b) Após a queima.....	37
Figura 16 – Frasco volumétrico de Le Chatelier.....	39
Figura 17 – Aparelho de permeabilidade Blaine.....	40
Figura 18 – Misturador manual e recipiente utilizados para moldagem das argamassas.....	43
Figura 19 – Tanque de cura dos corpos de prova com água saturada de cal.....	43
Figura 20 – Aspecto visual dos corpos de prova após a retífica.....	44
Figura 21 – Prensa universal utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.....	44
Figura 22 – Curvas granulométricas dos cinco lotes de KRP.....	45
Figura 23 – Frações típicas observadas nos lotes de KRP durante o peneiramento.....	47
Figura 24 – Aspecto visual típico da fração de KRP retida na peneira de 150 µm....	47

Figura 25 – Aspecto visual típico do KRP no peneiramento por lavagem. (a) Antes secagem na estufa; (b) Após a secagem na estufa.	48
Figura 26 – Resistência à compressão dos cimentos CPII-E.....	57
Figura 27 – Razão de crescimento da resistência à compressão dos cimentos CPII-E.	58
Figura 28 – Resistência à compressão dos cimentos CPIII.	62
Figura 29 – Razão de crescimento da resistência à compressão dos cimentos CPIII.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da escória KR obtida por diferentes pesquisadores (%).....	21
Tabela 2 – Limites de composição do cimento Portland (% de massa).	27
Tabela 3 – Requisitos químicos do cimento Portland (% de massa).....	28
Tabela 4 – Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland.....	28
Tabela 5 – Data da coleta de cada lote de KRP utilizado na pesquisa.	35
Tabela 6 – Composição dos cimentos ensaiados.	42
Tabela 7 – Material mais fino que a peneira de 75 µm, por lavagem, dos cinco lotes de KRP.....	46
Tabela 8 – Massa específica do CP V e EGAF.....	48
Tabela 9 – Massa específica dos cinco lotes de KRP.....	48
Tabela 10 – Superfície específica do CP V e EGAF.	50
Tabela 11 – Superfície específica dos cinco lotes de KRP.	50
Tabela 12 – Perda ao fogo do CP V e EGAF.....	51
Tabela 13 – Perda ao fogo dos cinco lotes de KRP.	52
Tabela 14 – Resíduo insolúvel do CP V e EGAF.	53
Tabela 15 – Resíduo insolúvel dos cinco lotes de KRP.	53
Tabela 16 – Resultados de resistência à compressão do cimento CPV ARI utilizado na produção dos cimentos.	54
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão dos cimentos CPII-E.	56
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão dos cimentos CPIII.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	PROCESSO SIDERÚRGICO E SEUS COPRODUTOS	16
3.2	ESCÓRIA KR	18
3.2.1	Origem	18
3.2.2	Caracterização física e química	20
3.2.3	Basculamento de escória KR	23
3.3	CIMENTO PORTLAND	25
3.4	ESCÓRIA KR COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR	29
4	METODOLOGIA	34
4.1	MATERIAIS	34
4.1.1	Cimento	34
4.1.2	Pó de despoieiramento do basculamento de escória KR	35
4.1.3	Escória granulada de alto-forno	36
4.1.4	Agregado miúdo	37
4.1.5	Água	38
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
4.2.1	Caracterização dos materiais	38
4.2.1.1	Composição granulométrica	38
4.2.1.2	Massa específica	39
4.2.1.3	Finura	39
4.2.1.4	Perda ao fogo	40
4.2.1.5	Resíduo insolúvel	41

4.2.2	Preparo, moldagem e cura dos corpos de prova.....	41
4.2.3	Resistência à compressão axial.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	45
5.1.1	Composição granulométrica	45
5.1.2	Massa específica	48
5.1.3	Finura.....	49
5.1.4	Perda ao fogo.....	51
5.1.5	Resíduo insolúvel	52
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	54
6	CONCLUSÃO	67
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um ligante hidráulico, constituído basicamente de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, sulfatos de cálcio e adições minerais (ABNT, 2018). Em função de suas propriedades adesivas e coesivas, o cimento Portland é amplamente utilizado como aglomerante na produção de concretos e argamassas, permitindo obter composições com resistência mecânica e durabilidade adequadas para usos estruturais em diversas condições (NEVILLE, 2016).

Contudo, do ponto de vista ambiental, a indústria de cimento representa cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) e é também o terceiro maior consumidor de energia a nível industrial (IEA, 2018).

Nesse contexto, a redução da proporção do clínquer na composição do cimento, por meio da substituição parcial por materiais cimentícios suplementares (SCM), é uma estratégia para a descarbonização desse setor (IEA, 2018; SNELLINGS *et al.*, 2023). Resíduos industriais, como é o caso da escória granulada de alto-forno (EGAF), proveniente da indústria siderúrgica, e da cinza volante, originária de termelétricas, são materiais cuja aplicação na substituição do clínquer está consolidada.

Na siderurgia, durante os processos de fabricação do ferro-gusa e do aço, também são gerados outros coprodutos além da EGAF, como a escória de dessulfuração e a escória de aciaria. A produção estimada desses materiais é de 622 kg por tonelada de aço bruto, sendo que 7% desse total são estocados ou destinados à disposição final (IAB, 2020). Entretanto, alguns desses resíduos, devido à sua alta alcalinidade, podem causar a poluição de águas subterrâneas quando dispostos em aterros (DU *et al.*, 2022a).

Portanto, a utilização desses resíduos como SCM alia dois interesses: o da siderurgia, ao garantir uma destinação adequada ao material sem causar danos ao meio ambiente; e o do setor cimenteiro, ao reduzir a utilização de clínquer, devido ao alto impacto ambiental associado ao seu processo de produção.

As escórias de dessulfuração do ferro-gusa são um resíduo comum nas siderúrgicas que empregam o minério de ferro como matéria-prima (KUO; HOU, 2014). Dentre os

métodos utilizados para dessulfuração, destaca-se o método da agitação do *Kambara Reactor* (KR), cujo coproduto resultante do processo é a escória KR. As aplicações da escória KR envolvem o melhoramento de solos, a composição de aterros e a substituição de carbonato de cálcio na fabricação de clínquer (KUO; HOU, 2014).

A escória KR, após sua geração durante o processo de dessulfuração, é descarregada em pátios onde é submetida a processos de resfriamento e beneficiamento. Para reduzir os impactos ambientais decorrentes da emissão de poeira durante o basculamento do material, em algumas plantas são instalados sistemas de controle de emissões atmosféricas que capturam o material particulado gerado durante esse processo, dando origem ao pó de despoeiramento do basculamento de escória KR (KRP).

Sob a perspectiva ambiental, a crescente demanda por controlar as emissões de material particulado nas diferentes etapas do processo siderúrgico resultou na geração de novos resíduos, como é o caso do KRP. No entanto, ao contrário da EGAF, o aproveitamento desse resíduo ainda não é difundido, sendo sua disposição final realizada em aterros sanitários ou em pátios de estocagem de material.

Considerando a necessidade emergente da redução das emissões de CO₂ na indústria do cimento e do reaproveitamento de resíduos industriais, estudos acerca da utilização de novos SCM são de extrema importância. Nesse cenário, este trabalho tem por objetivo analisar a incorporação de diferentes lotes do pó proveniente do sistema de despoeiramento do basculamento de escória KR de uma indústria siderúrgica na composição de cimentos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O estudo tem como objetivo principal analisar a viabilidade da utilização do pó proveniente do sistema de despoeiramento dos processos de basculamento de escória KR e gusa em emergência, como material cimentício suplementar na produção de cimentos compostos, a partir de diferentes lotes desse pó.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física e química dos diferentes lotes do pó de despoeiramento do basculamento de escória KR;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes lotes do pó de despoeiramento do basculamento de escória KR, em substituição ao aglomerante, na resistência mecânica à compressão de argamassas.

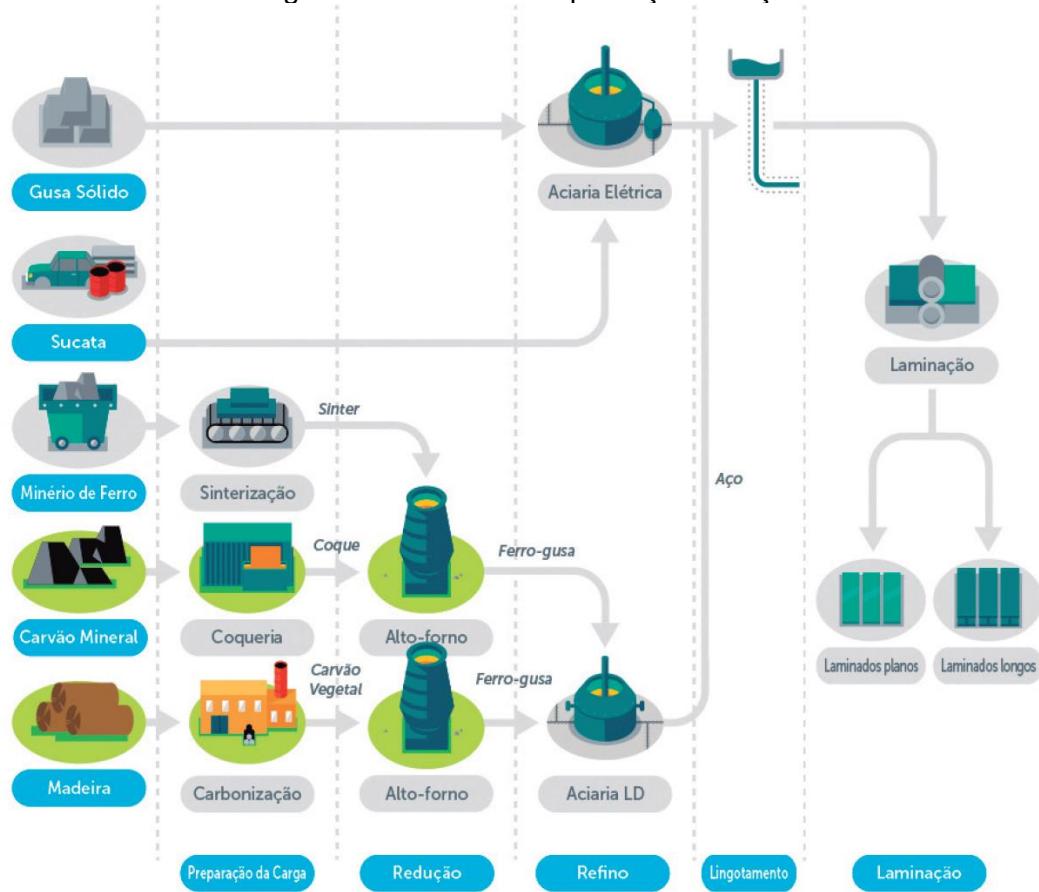
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO SIDERÚRGICO E SEUS COPRODUTOS

A indústria brasileira do aço é composta por um parque produtor de 31 usinas, sendo 16 integradas e 15 semi-integradas, com uma capacidade instalada de 51,0 milhões de toneladas de aço bruto por ano (IAB, 2023). Essa robusta infraestrutura coloca o Brasil na 9^a posição do ranking mundial da produção de aço, destacando a relevância do país no cenário global da siderurgia (IAB, 2023).

As usinas integradas produzem o aço a partir do minério de ferro, usando o carvão como agente redutor nos altos-fornos para obtenção do ferro-gusa. As quatro principais fases do processo produtivo do aço nas usinas integradas são: preparação da carga, redução, refino e laminação. Já as usinas semi-integradas possuem apenas as fases de refino e laminação, visto que utilizam sucata de aço e ferro-gusa para alimentar as aciarias elétricas (CNI, 2017). A Figura 1 apresenta de forma esquemática o fluxo de produção do aço.

Figura 1 – Processo de produção do aço.



Fonte: CNI (2017).

O processo siderúrgico em uma usina integrada inicia com a seleção, compra e transporte das matérias-primas necessárias, principalmente o minério de ferro e o carvão mineral. Na sequência, os minérios são encaminhados para a sinterização, enquanto o carvão mineral é enviado para a coqueria.

A sinterização é um processo de aglomeração por fusão de uma mistura de finos de minério, coque ou carvão vegetal, fundentes e água, que resulta na formação do sínter. Já a coqueificação é um processo de destilação do carvão, cujo resultado é o coque. Esse procedimento é necessário para que o coque apresente algumas propriedades como: alta resistência para evitar a sua degradação no alto-forno, alto teor de carbono, baixa reatividade e baixo teor de enxofre (MOURÃO, 2007).

O sínter e o coque seguem para o alto-forno, onde é produzido o ferro-gusa — produto resultante da redução do minério de ferro pelo carbono. Por meio do sopro de ar quente pelas ventaneiras, parte do coque é queimado fornecendo calor às reações químicas e para a fusão do ferro, enquanto o restante do coque e o monóxido de carbono (CO) formado na queima removem o oxigênio combinado com os óxidos de ferro nas reações de redução (SILVA; MEI, 2021).

Em seguida, o ferro-gusa é transportado, ainda líquido, em panela ou carros-torpedo, para a aciaria, onde ocorre a etapa de refino. Nessa etapa, para alcançar a composição química desejada do aço, são realizados, principalmente, processos de redução do teor de carbono, fósforo e enxofre (SILVA; MEI, 2021).

Por último, após a solidificação do aço em forma de placas, blocos ou tarugos no lingotamento, tem-se a etapa da laminAÇÃO, que transforma os semiacabados em produtos acabados, como chapas, bobinas de aço, barras, entre outros.

Durante o processo siderúrgico, além da produção do aço, também são gerados coprodutos, materiais para os quais foram desenvolvidas tecnologias que possibilitam sua utilização de forma ambientalmente responsável, seja como matéria prima ou fonte de energia, tanto pela indústria siderúrgica quanto por terceiros (CNI, 2017). Os principais coprodutos dessa cadeia produtiva são escórias de alto-forno e aciaria, lamas, pós e finos oriundos de sistemas de controle de emissões atmosféricas.

Para cada tonelada de aço bruto, são gerados 622 kg de coprodutos e resíduos —

desse total, os agregados siderúrgicos de alto-forno e de aciaria representam 65% (IAB, 2020). Formadas nos processos de produção do ferro-gusa e de refino do aço, as escórias possuem formulação química bem definida, obtidas a partir de adições controladas, cuja função é reter óxidos e outros compostos indesejáveis a serem removidos dos metais (SILVA; MEI, 2021; SILVA, 2023).

Dados do Instituto Aço Brasil (2020) revelam que, enquanto mais de 90% das escórias de alto-forno são destinadas à venda para a indústria cimenteira, a principal destinação do agregado siderúrgico de aciaria é a formação de estoque passivo (36%), seguida da venda (23%). Ainda que a escória de aciaria possua várias possibilidades de aplicação, tais como em bases e sub-bases de estradas, nivelamento do terreno, uso agronômico, lastro ferroviário e como agregado para produção de concreto, sua principal limitação tecnológica está relacionada à característica de expansão volumétrica do material (MOURÃO, 2007; IAB, 2020).

Do ponto de vista ambiental, a crescente demanda por controlar as emissões de material particulado ao longo das diferentes etapas do processo siderúrgico resultou na geração de novos resíduos, como é o caso dos pós e finos provenientes de sistemas de controle de emissões atmosféricas. No entanto, ao contrário das escórias de alto-forno e de aciaria, a reutilização desses resíduos ainda não é difundida, sendo sua disposição final realizada em aterros sanitários ou pátios de estocagem de material.

3.2 ESCÓRIA KR

3.2.1 Origem

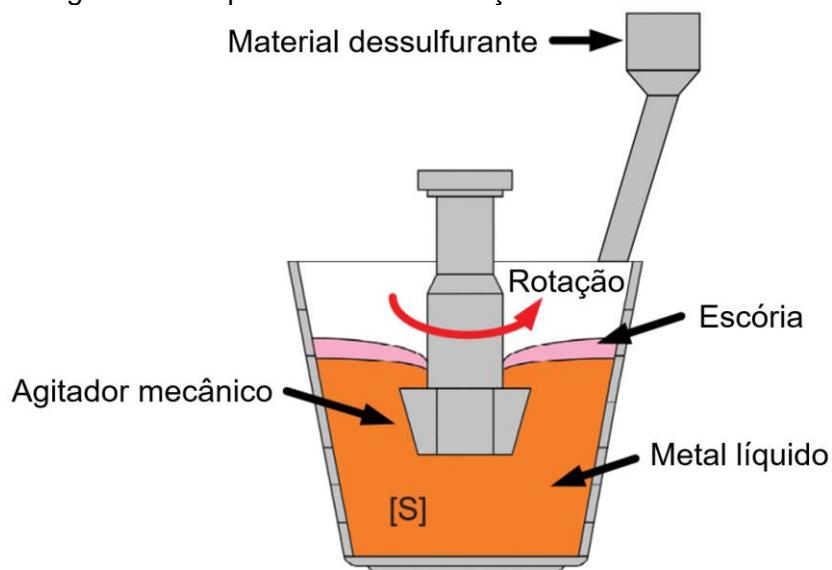
Tendo em vista a composição típica do ferro gusa, é necessário reduzir o teor de alguns elementos indesejáveis, como carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre, a fim de alcançar a composição desejada nos aços (SILVA; MEI, 2021). O enxofre, em particular, é uma impureza crítica para os aços, sendo uma das principais causas de baixa ductilidade a quente — o que prejudica a etapa de laminação (SILVA, 2023). Além disso, quanto maior o teor desse elemento no aço, piores são as propriedades de resistência mecânica do material (KIRMSE, 2006).

Proveniente dos carvões utilizados na produção do coque, redutor no processo do alto-forno, o enxofre pode chegar a uma concentração de 0,1% no ferro-gusa (SILVA, 2023). Diversas aplicações do aço possuem como requisito de qualidade teores de enxofre abaixo de 50 ppm e, por razões de mercado, empresas têm se empenhado para atender a essas exigências (KIRMSE, 2006).

Assim, como o alto-forno não é otimizado para a remoção do enxofre, o pré-tratamento do ferro gusa e/ou dessulfuração na aciaria são necessários. Em usinas integradas, tem sido amplamente empregado o tratamento do ferro-gusa líquido em carros-torpedo ou em panelas de transferência, antes do carregamento nos convertedores (SILVA; MEI, 2021).

Os dois principais métodos de pré-tratamento de dessulfuração do ferro-gusa são o método de agitação do reator Kambara (KR) e o método de injeção, sendo o método de agitação do KR o processo mais eficaz (DU *et al.* 2022a). No processo do KR, conforme Figura 2, um agitador mecânico realiza a mistura de um agente dessulfurante, como a cal (CaO), no metal líquido. Na sequência, o enxofre reage com o CaO, gerando o sulfeto de cálcio (CaS). O composto CaS e o CaO que não reagiu durante a mistura sobem à superfície em função da sua baixa densidade específica, formando uma escória chamada de escória KR (CHO; CHOI, 2016; DU *et al.* 2022a).

Figura 2 – Esquema de dessulfuração do reator Kambara.



Fonte: Adaptado de Wu *et al.* (2020).

A cal absorve o enxofre rapidamente, enquanto o carbono, também presente no metal líquido, reage com o oxigênio gerado pela reação, formando o monóxido de carbono (CO) (WU *et al.*, 2020). As principais reações que ocorrem durante o processo de dessulfuração no KR são indicadas nas Equações 1 e 2 (CHO; CHOI, 2016):



Ao final da agitação do KR, a escória KR é removida e encaminhada para pátios, onde ocorre seu resfriamento. Após a aspersão de água sobre a escória, esse material é britado para facilitar a liberação do ferro metálico contido na escória e, por meio de separação magnética, a sucata metálica e concentrados ferrosos são recuperados (CHO *et al.*, 2018). Segundo Zhang e Xu (2009, *apud* DU *et al.*, 2022b), são gerados de 7 a 9 kg/ton de coprodutos de dessulfuração durante o pré-tratamento do ferrogusa.

3.2.2 Caracterização física e química

A escória KR consiste em grãos com formato de areia cujo diâmetro é de 2 mm ou menos. Sua composição química é abundante em CaO e, por ser resfriada com sprays de água, grande parte do óxido de cálcio é transformado em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (CHO; CHOI, 2016).

Conforme mencionado anteriormente, a escória KR é submetida a processos de separação magnética e britagem, de modo que sua distribuição granulométrica está diretamente ligada ao ajuste de granulometria feito durante a etapa de beneficiamento do material. Uma caracterização realizada por Dieguez *et al.* (2019) mostrou que 21,2% dos grãos da escória KR são menores do que 150 μm , enquanto mais de 70% do material situa-se na faixa entre 150 μm e 1,18 mm.

Na produção de cimentos, são utilizadas partículas com tamanho menor do que 75 μm . Em função disso, a escória KR passa por etapas adicionais de moagem para possibilitar sua aplicação na composição de cimentos. No estudo conduzido por Costa *et al.* (2021), após o ajuste granulométrico da escória KR realizado com um britador de mandíbulas, seguido por um moinho de bolas por 12 horas, e peneiramento através

de uma peneira de abertura 150 μm , a área superficial específica do material encontrada foi de 9690 cm^2/g . Du *et al.* (2022b), também realizaram etapas adicionais de moagem na escória KR com o intuito de obter um pó, resultando em uma área superficial específica de 4140 cm^2/g .

A massa específica da escória KR, outra propriedade física importante, após a condução de todos os ajustes granulométricos, situa-se entre 3,01 g/cm^3 (CHO *et al.*, 2018) e 3,19 g/cm^3 (COSTA *et al.*, 2021).

Quanto à composição química da escória KR, diversos autores conduziram análises de fluorescência de raios-X (FRX) para determinar os componentes deste material, conforme indicado na Tabela 1. Os principais constituintes da escória KR são o óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe_2O_3) e dióxido de silício (SiO_2). A presença do CaO , em teores maiores que 45%, é justificada em função da adição de cal durante o pré-tratamento de dessulfuração do ferro-gusa. De modo similar, apesar dos processos de separação magnética pelos quais a escória KR é submetida, uma proporção considerável de ferro permanece no material, na forma de Fe_2O_3 .

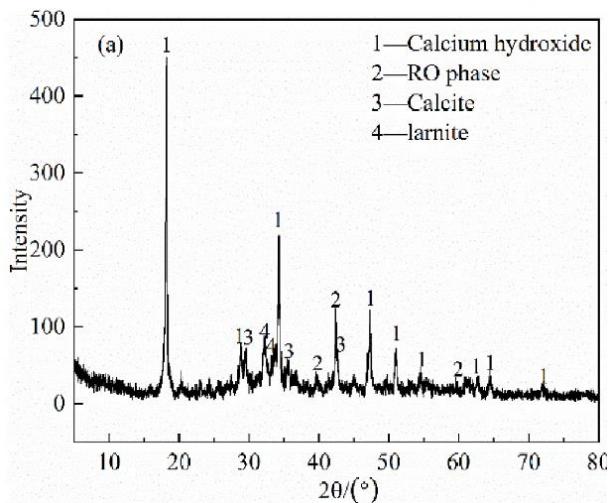
Tabela 1 – Composição química da escória KR obtida por diferentes pesquisadores (%).

Autores	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	P_2O_5	Al_2O_3	MnO	TiO_2	SO_3	K_2O
Du <i>et al.</i> , 2022a	53,5	18,0	9,9	6,5	0,9	3,4	1,2	0,2	4,0	-
Du <i>et al.</i> , 2022b	58,3	20,7	8,1	1,7	0,1	2,2	0,2	0,2	5,0	-
Costa <i>et al.</i> , 2021	54,0	25,7	8,5	1,6	-	1,7	3,3	-	3,6	0,4
Dieguez <i>et al.</i> , 2019	47,8	-	12,3	3,8	0,2	4,5	1,0	-	-	0,0
Cho <i>et al.</i> , 2018	62,2	11,6	10,6	1,5	-	1,2	-	-	5,2	-

Fonte: Autora (2024).

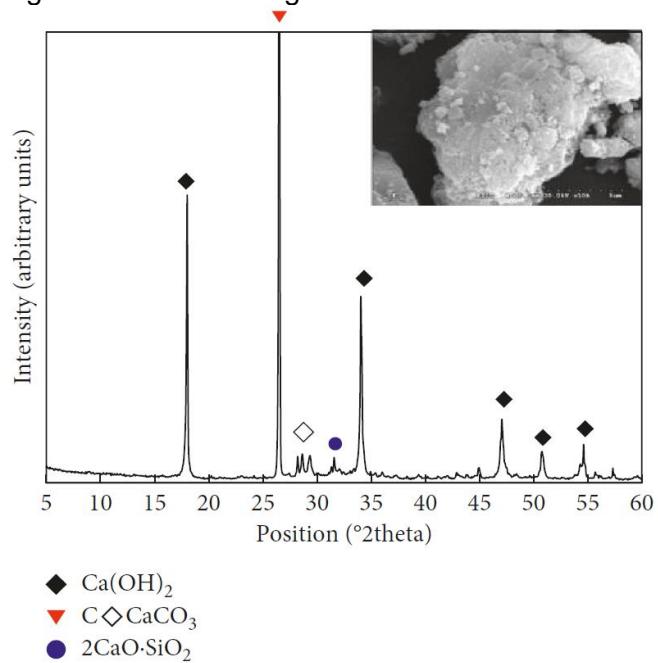
O ensaio de difração de raios-X (DRX) realizado por Du *et al.* (2022a) indica que as principais fases minerais da escória KR são o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a fase RO (solução sólida de $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MnO}-\text{MgO}$), carbonato de cálcio (CaCO_3) e o silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), conforme mostrado na Figura 3. Da mesma forma, o resultado do DRX obtido por Du *et al.* (2022b), em um estudo posterior, também indica como principais fases minerais da escória KR o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , Ca_2SiO_4 , a ferrita de cálcio (C_2F) e a mesma fase RO observada no seu estudo anterior.

Figura 3 – DRX da escória KR.

Fonte: Du *et al.* (2022a).

Na Figura 4 é possível observar o resultado do ensaio de DRX e a imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da escória KR utilizada no estudo conduzido por Cho *et al.* (2018). Segundo os autores, a escória KR contém principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, com alguns picos de CaCO_3 observados. Além disso, foi identificado um pico significativo de carbono cristalino no DRX, proveniente de coques que não foram queimados no alto-forno e acabaram sendo incorporados na camada de escória (CHO *et al.*, 2018). A imagem de MEV da escória KR revela uma superfície áspera, devido ao processo de resfriamento por aspersão de água e secagem, que forma partículas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e CaCO_3 (CHO *et al.*, 2018).

Figura 4 – DRX e imagem de MEV da escória KR.

Fonte: Cho *et al.* (2018).

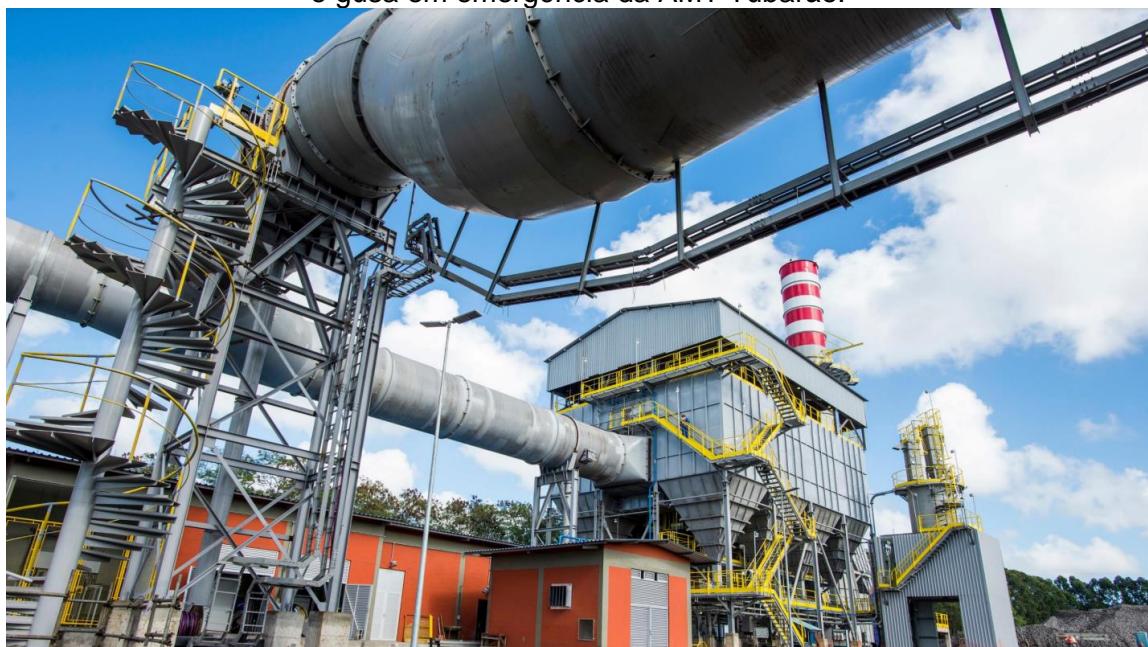
3.2.3 Basculamento de escória KR

O pó resultante do despoeiramento do basculamento de escória KR e gusa de emergência (KRP), objeto deste estudo, é proveniente da ArcelorMittal (AMT) Tubarão, localizada no município da Serra, no estado do Espírito Santo. Nesse sentido, vale destacar os processos que ocorrem nesta indústria para obtenção desse pó.

Após o tratamento preliminar de dessulfuração, a escória sobrenadante no ferro-gusa é retirada por um *skimmer*, equipamento específico para essa finalidade. A escória removida é vertida em um pote de escória, recipiente responsável pelo armazenamento e transporte desse material até as baias de basculamento. A escória KR, uma vez vertida nas baias, passa por um processo de resfriamento com pulverização de água, resultando em grãos menores do que os obtidos no processo de resfriamento ao ar (DIEGUEZ, 2018).

Para controlar as emissões fugitivas decorrentes dos processos de basculamento de escória KR, um sistema de despoeiramento (Figura 5) realiza a captação de partículas sólidas finas em suspensão no ar. Os filtros de mangas são comumente empregados em indústrias para o controle da poluição do ar, sendo uma das técnicas mais eficazes na remoção de partículas finas.

Figura 5 – Filtro de mangas do sistema de despoeiramento de basculamento de escória KR e gusa em emergência da AMT Tubarão.



Fonte: Reprodução LinkedIn - Joao Bosco Reis da Silva (2023).

A Figura 6 apresenta de forma esquemática o sistema de despoieiramento do basculamento de escória KR e basculamento de gusa em emergência da ArcelorMittal Tubarão. As partículas sólidas do ar são captadas pelas coifas nas baias de basculamento, diretamente na fonte das emissões. Um sistema de ventilação conectado às coifas cria um fluxo de ar na direção da entrada da coifa, possibilitando que o ar e poeira sejam conduzidos, por meio de dutos, até o filtro de mangas. No filtro, ocorre o processo de filtração mecânica, onde mangas feitas de tecido realizam a captura das partículas sólidas à medida que o ar passa por elas. O pó capturado segue para um silo de estocagem, sendo esvaziado quando atinge sua capacidade máxima. Ao final do processo, o ar purificado é liberado no ambiente através de uma chaminé.

Observa-se, na Figura 6, que existem dois pontos de captação de particulado, sendo um deles o do basculamento da escória KR, descrito anteriormente. Outro ponto de captação está situado nas baias de basculamento do ferro-gusa em situações de emergência. Quando a produção do ferro-gusa é superior à capacidade da aciaria, é necessário bascular o metal líquido na máquina de moldar gusa, formando lingotes sólidos que depois são reintegrados no processo produtivo do aço. Quando a capacidade da máquina de moldar gusa é atingida, a alternativa então é bascular o ferro-gusa nos pátios de emergência.

Figura 6 – Esquema ilustrativo do sistema de despoieiramento dos processos de basculamento de escória KR e basculamento de gusa em emergência da AMT Tubarão.



Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2020).

A produção de ferro-gusa ocorre de forma contínua nos altos-fornos, com exceção de paradas programadas para manutenção. Nesse contexto, a demanda de dessulfuração no KR também é constante. Dessa forma, a geração de escória KR e os processos de basculamento desse coproducto ocorrem constantemente. Por outro lado, o basculamento do ferro gusa nos pátios de emergência só acontece em circunstâncias específicas, ou seja, não é um processo que ocorre regularmente. Portanto, espera-se que as características do KRP se assemelhem mais às da escória KR do que às do ferro-gusa.

3.3 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland (CP) é um “ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais” (ABNT, 2018, p. 3). O clínquer é um produto granulado resultante da queima até a fusão parcial ou completa de constituintes minerais que, após a moagem, apresenta propriedades hidráulicas. Por sua vez, o clínquer Portland é majoritariamente composto por silicatos e aluminatos de cálcio hidráulicos, obtidos por meio da queima até a fusão parcial de uma mistura homogênea e proporcional, composta principalmente por calcário e argila (ABNT, 2018; BAUER, 2019).

Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e, quando somados, representam 95 a 96% do total na análise de óxidos. A mistura de matérias-primas que contenha proporções adequadas desses constituintes, finamente pulverizada e homogeneizada, ao ser submetida à ação do calor até a temperatura de fusão incipiente, resulta na formação do clínquer. Nesse processo, ocorrem combinações químicas que geram os seguintes compostos (BAUER, 2019):

- silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$);
- silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$);
- aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$);
- ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$).

Cada um desses compostos desempenha um papel fundamental nas propriedades do cimento. O C₃S é o principal responsável pelo ganho de resistência nas primeiras quatro semanas, enquanto o C₂S contribui para a resistência no período de um mês a um ano (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019). O C₃A contribui para a resistência da pasta de cimento do primeiro ao terceiro dia, ao passo que o C₄AF não contribui em nada para a resistência (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019).

A reação do C₃A com a água resulta no enrijecimento instantâneo da pasta, conhecido como pega instantânea (NEVILLE, 2016). Para controlar o tempo de hidratação e evitar essa ocorrência, adiciona-se sulfato de cálcio (gesso) ao clínquer. Assim, o sulfato de cálcio e o C₃A reagem formando um sulfoaluminato de cálcio insolúvel (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019). O C₃S é outro componente responsável pelo tempo de pega do cimento (BAUER, 2019).

Além do clínquer Portland e dos sulfatos de cálcio, os cimentos contêm em sua composição adições minerais, tais como as escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos, os quais exercem influência sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas de pastas, argamassas e concretos.

Quanto às escórias, quimicamente, são uma mistura de óxido de cálcio, sílica e alumina — os mesmos óxidos que compõem o CP, mas em proporções distintas. Cimentos com elevado teor de escória possuem baixo calor de hidratação, no entanto, essa menor liberação de calor está associada ao menor desenvolvimento de resistência (NEVILLE, 2016).

Os materiais pozolânicos, por sua vez, são materiais silicosos ou silicoaluminosos com pouca ou nenhuma atividade hidráulica. Quando finamente moídos e em contato com a água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos cimentícios (ABNT, 2018). De modo geral, as vantagens do uso de cimentos pozolânicos assemelham-se às do cimento com escória de alto-forno.

Em contrapartida, os materiais carbonáticos são materiais finamente moídos, com finura semelhante à do cimento Portland, compostos em sua maior parte de carbonato de cálcio (NEVILLE, 2016; ABNT, 2018). Em geral, são quimicamente inertes e exercem efeito benéfico em propriedades físicas do concreto, como trabalhabilidade, permeabilidade e exsudação (NEVILLE, 2016).

Os limites da composição dos cimentos Portland normalizados no Brasil, levando em consideração as adições mencionadas, são apresentados na Tabela 2. A NBR 16697:2018 também estabelece três classes de resistência para os cimentos Portland, 25, 32 ou 40 MPa aos 28 dias. Contudo, ressalta-se que o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V) e o cimento Portland branco (CPB) não estrutural são exceções. O CP V-ARI, por exemplo, deve apresentar resistência superior a 14 MPa em um dia, enquanto o CPB não estrutural não possui uma especificação de classe de resistência (ABNT, 2018).

Tabela 2 – Limites de composição do cimento Portland (% de massa).

Designação normalizada	Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	95 – 100		0 – 5	
	CP I-S	90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E	51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto-forno	CP III	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural	50 – 74	–	–	26 – 50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018).

Requisitos químicos, físicos e mecânicos específicos, estabelecidos para cada tipo de CP e suas respectivas classes de resistência, são indicados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Requisitos químicos do cimento Portland (% de massa).

Sigla	Resíduo insolúvel (RI)	Perda ao fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO ₃)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	–	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	–	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP IV	–	≤ 6,5	–	≤ 4,5
CP V	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018).

Tabela 4 – Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland.

Sigla	Classe	Finura Resíduo na 75 µm %	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa			
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CP I-S								
CP II-E	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CP II-F								
CP II-Z	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CP III								
CP IV	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	–
	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5		≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
CPB Estrutural								
	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5		≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPB Não estrutural	–	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	–	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018).

3.4 ESCÓRIA KR COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Materiais cimentícios suplementares (SCMs) são comumente empregados como substituição parcial ao clínquer Portland, contribuindo para o desempenho mecânico e durabilidade por meio de reações pozolânicas ou reações hidráulicas latentes (SNELLINGS *et al.*, 2023).

Em geral, materiais cujas fases são predominantemente amorfas, compostos por aluminossilicatos de cálcio, são considerados candidatos ideais para SCMs. Entretanto, é fundamental que esses materiais apresentem propriedades físicas e químicas adequadas, volumes de suprimento compatíveis e não manifestem, de maneira significativa, efeitos negativos na consistência, hidratação, desenvolvimento de resistência e durabilidade (SNELLINGS *et al.*, 2023).

Um estudo conduzido por Dieguez (2018) analisou a influência da adição de escória KR moída a um CP III 40 disponível comercialmente, em teores de 5%, 15% e 30% em massa, com relação à expansibilidade, tempo de início e fim de pega, e resistência à compressão. Os resultados obtidos indicam que a escória KR não é expansiva, sendo que a maior expansão encontrada foi de 0,5 mm, o que representa 10% do limite estabelecido pela NBR 16697:2018. O tempo de início e fim de pega diminuíram com o aumento do teor de escória KR. De modo similar, observou-se uma redução da resistência com o aumento do teor de escória KR — situação justificada pela autora devido à dificuldade de moer a escória KR a níveis adequados, uma vez que o material apresentou 23% de resíduo na peneira de 75 µm.

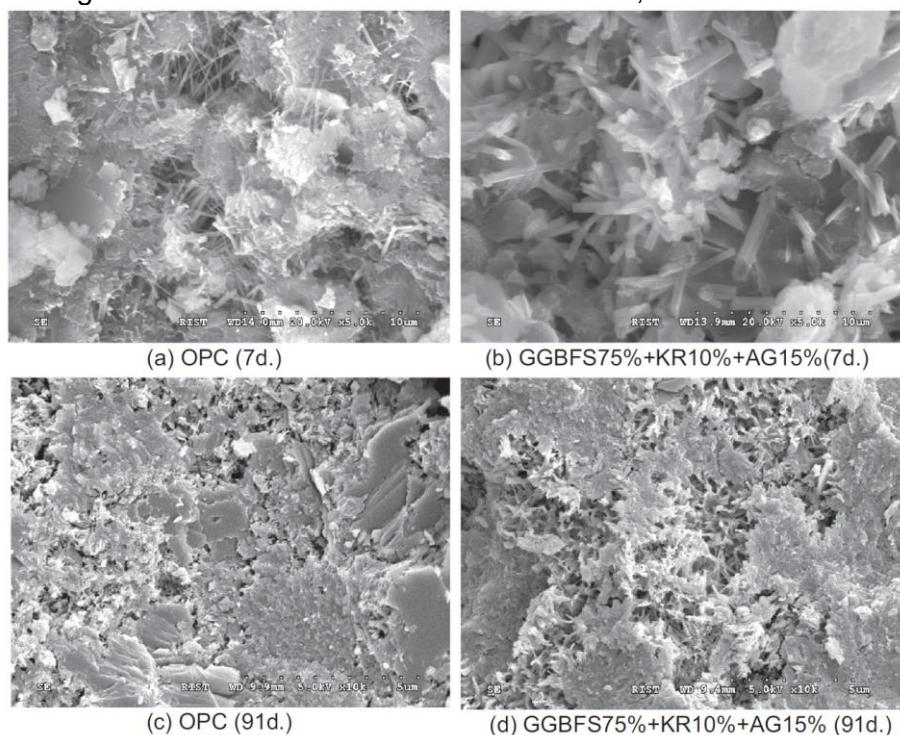
Materiais hidráulicos latentes, como a escória granulada de alto-forno (EGAF), podem reagir com a água quando ativados, por exemplo, por álcalis solúveis (NEVILLE, 2016; SNELLINGS *et al.*, 2023). Com constituintes químicos semelhantes aos do cimento Portland (CP), um alto valor de pH, um teor elevado de óxido de cálcio (CaO) e um baixo teor de metais pesados, a escória KR, combinada com a EGAF, tem sido estudada por vários pesquisadores para a produção de ligantes ativados por álcalis (KUO; HOU, 2014).

Cho e Choi (2016) avaliaram as propriedades físicas e químicas de um concreto produzido com um ligante composto por EGAF, pó de escória KR (com finura Blaine igual a 4040 cm²/g) e gesso. Em pesquisas anteriores, os autores constataram que a

resistência à compressão do ligante composto apenas por EGAF e escória KR era significativamente inferior à do cimento Portland comum. Portanto, a adição do gesso teve como objetivo melhorar o desempenho mecânico desse ligante. O teor de escória KR foi fixado em 10%, enquanto o gesso anidro foi adicionado em teores de 9%, 12% e 15%. Como resultado, obteve-se que a resistência à compressão aos 28 dias do concreto composto por 75% de EGAF, 10% de escória KR e 15% de gesso, foi de 41,4 MPa, semelhante à do CP comum (44,8 MPa) e à do cimento com adição de 50% de EGAF (43,3 MPa).

No entanto, a retração por secagem e a porosidade do concreto com o ligante composto por EGAF, escória KR e gesso foram consideravelmente mais elevados do que os do CP comum e do cimento com 50% de EGAF. Resultados da análise por MEV identificaram que o principal produto de hidratação desse ligante é a etringita em forma de agulha espessa, que forma uma estrutura porosa, levando a uma maior retração por secagem (CHO; CHOI, 2016). Na Figura 7 é possível observar a diferença de espessura, aos 7 dias, da etringita formada na mistura OPC (contendo apenas CP comum) quando comparada à etringita formada no concreto GKGB (composto por 75% de EGAF, 10% de escória KR e 15% de gesso). Aos 91 dias, é possível observar que a porosidade é maior no concreto GKBB.

Figura 7 – MEV dos concretos OPC e GKGB, aos 7 e 91 dias.

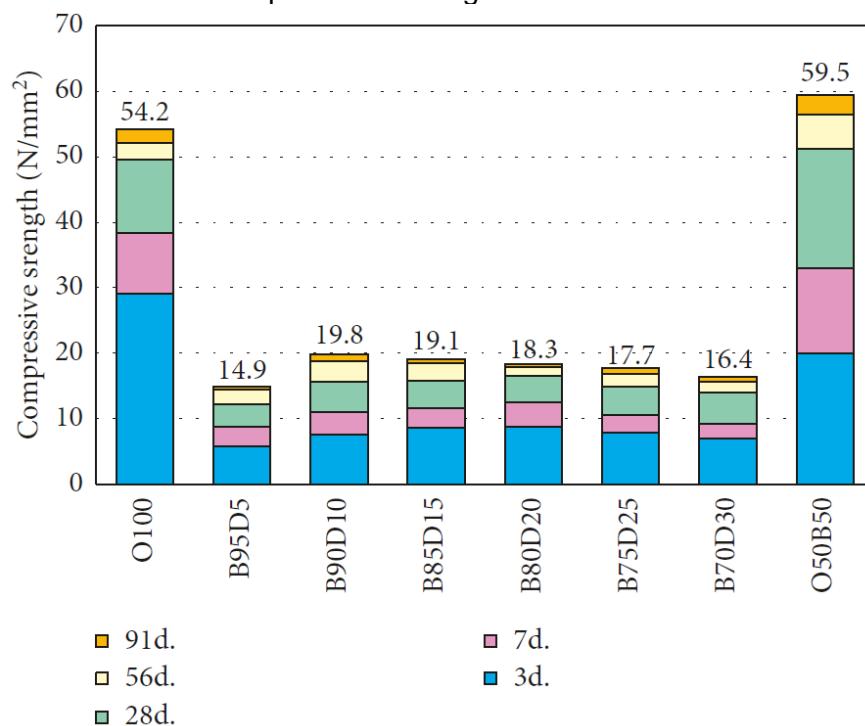


Fonte: Cho e Choi (2016).

Cho *et al.* (2018), em um estudo posterior, exploraram a aplicação da escória KR como ativador alcalino na produção de argamassas, analisando tanto a resistência à compressão quanto as propriedades da microestrutura. Foram avaliadas misturas contendo 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de escória KR em relação ao peso de EGAF. Além disso, os traços com o teor de escória KR fixado em 10%, com adição de gesso em teores de 9%, 12% e 15% em relação ao peso de EGAF também foram avaliados.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas contendo EGAF e escória KR, obtidos por Cho *et al.* (2018) são indicados na Figura 8. Nota-se que a resistência das argamassas varia de 14,9 MPa (B95D5) a 19,8 MPa (B90D10) após 91 dias. Os valores de resistência foram muito inferiores em comparação com os das misturas de referência (O100 e O50B50) em todas as idades. Diante desses resultados, os autores concluíram que a quantidade adequada de escória KR em sistemas ativados por álcalis com EGAF situa-se na faixa de 10 a 15%.

Figura 8 – Resistência à compressão das argamassas contendo EGAF e escória KR.

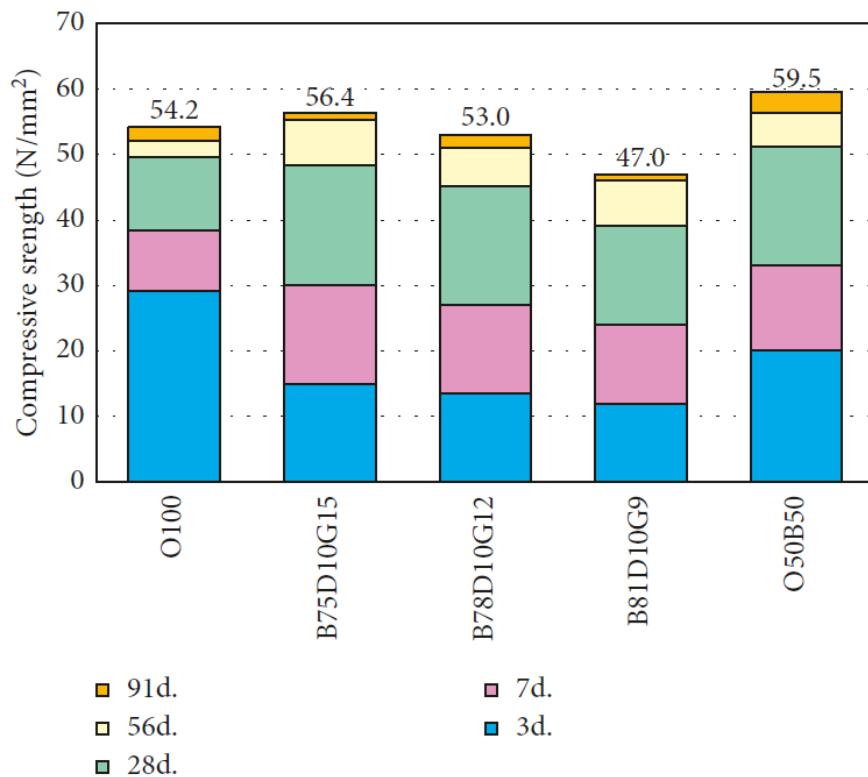


Fonte: Cho *et al.* (2018).

Os resultados de resistência à compressão das misturas ativadas por álcalis, contendo EGAF, escória KR (com teor fixado em 10%) e gesso, obtidos por Cho *et al.* (2018) são destacados na Figura 9. Observa-se que as resistências nas idades

iniciais, aos 3 e 7 dias, foram inferiores em relação às argamassas de referência (O100 e O50B50). Aos 28 dias, no entanto, a mistura B75D10G15 alcançou 48,4 MPa — 97,5% do valor obtido para a mistura O100 contendo apenas cimento Portland comum (49,6 MPa). Após 56 dias, o aumento na resistência à compressão das misturas com EGAF, escória KR e gesso foi pouco significativo.

Figura 9 – Resistência à compressão das argamassas contendo EGAF, escória KR e gesso.



Fonte: Cho *et al.* (2018).

Ao analisar por DRX (Figura 10) as argamassas contendo 80% de EGAF e 20% de escória KR (B80D20), Cho *et al.* (2018) observaram que os principais produtos de hidratação formados foram $\text{Ca}(\text{OH})_2$, grafite, CaCO_3 e C-S-H de baixa cristalinidade. Em contrapartida, os principais produtos de hidratação identificados na argamassa com 75% de EGAF, 10% de escória KR e 15% de gesso (B75D10G15), são etringita, devido à presença de gesso na amostra.

Cho *et al.* (2018) concluíram que a adição de gesso no ligante produzido a partir de EGAF e escória KR, é capaz de produzir sistemas ativados por álcalis com resistências à compressão semelhantes às do cimento Portland comum. De acordo com Kuo e Hou (2014), a elevada concentração de álcalis (CaO) da escória KR proporciona as condições adequadas para ativar o processo de hidratação da EGAF, alcançando o desenvolvimento de resistência.

Figura 10 – DRX das argamassas O100, O50B50, B80D20 e B75D10G15.

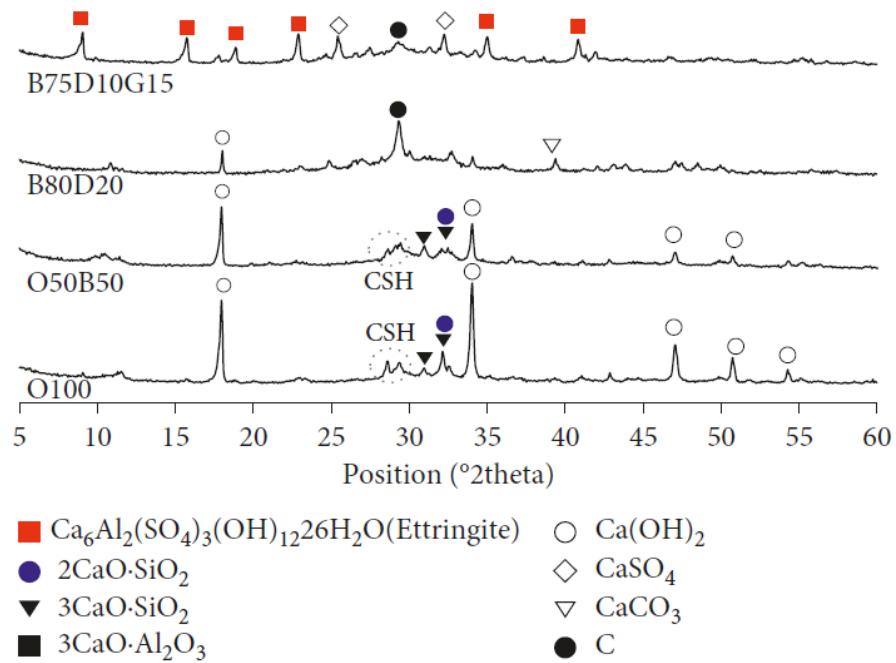


FIGURE 6: XRD spectra.

Fonte: Cho *et al.* (2018).

4 METODOLOGIA

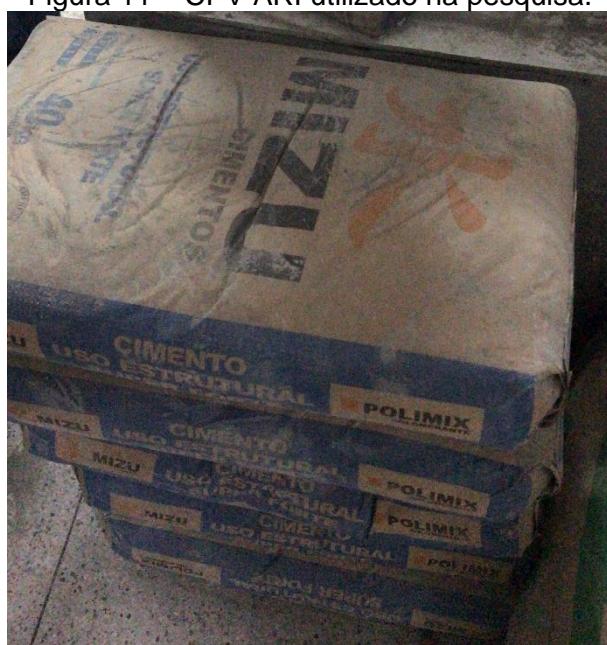
Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada na condução da pesquisa experimental deste projeto de graduação. Serão detalhados os materiais utilizados, bem como os procedimentos e normas empregados na realização dos ensaios laboratoriais.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI), conforme indicado na Figura 11, fabricado pela Mizu Cimentos, localizada na cidade de Vitória, Espírito Santo. Após o recebimento do material no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC), situado no Centro Tecnológico do Campus Goiabeiras da Universidade Federal de Espírito Santo (UFES), o cimento foi armazenado em sacos plásticos de 2 kg e embalado com mais duas camadas, sendo uma delas em um saco maior, de 25 kg. Além disso, utilizou-se sílica ativa entre as camadas como indicador de umidade. O cimento, devidamente armazenado, foi mantido em câmara seca até o momento da sua utilização nos ensaios de caracterização e moldagem das argamassas.

Figura 11 – CPV ARI utilizado na pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

A justificativa para escolha deste cimento é o fato de que, dentre os cimentos normalizados pela NBR 16697:2018 e comumente comercializados no país, o CP V ARI é o que apresenta o menor teor de adição mineral. Sua composição pode ter, no máximo, 10% de material carbonático (fíller calcário), sendo o restante constituído por clínquer Portland e sulfatos de cálcio (ABNT, 2018).

4.1.2 Pó de despoeiramento do basculamento de escória KR

O pó de despoeiramento do basculamento de escória KR e gusa em emergência (KRP) é um resíduo siderúrgico oriundo da ArcelorMittal Tubarão, localizada no Polo Industrial Tubarão, no município da Serra, Espírito Santo.

Conforme descrito no item 3.2.3 deste trabalho, o KRP fica armazenado em um silo de estocagem que integra o conjunto de equipamentos do sistema de despoeiramento até que a capacidade máxima do silo seja atingida. Quando isso acontece, é necessário drenar o pó, que depois é encaminhado para aplicação ou destinação adequada. Para as coletas de amostras utilizadas nessa pesquisa, optou-se por coletar o material no momento da drenagem do silo, com o intuito de evitar contaminação com outros materiais.

Foram coletados cinco lotes de KRP ao longo de um semestre, com o intuito de avaliar se o material apresenta uma variabilidade significativa em suas características. Na Tabela 5, são indicadas as datas da coleta de cada um dos lotes. Após a coleta, o material foi identificado e enviado para o LEMAC em sacos plásticos de 15 kg.

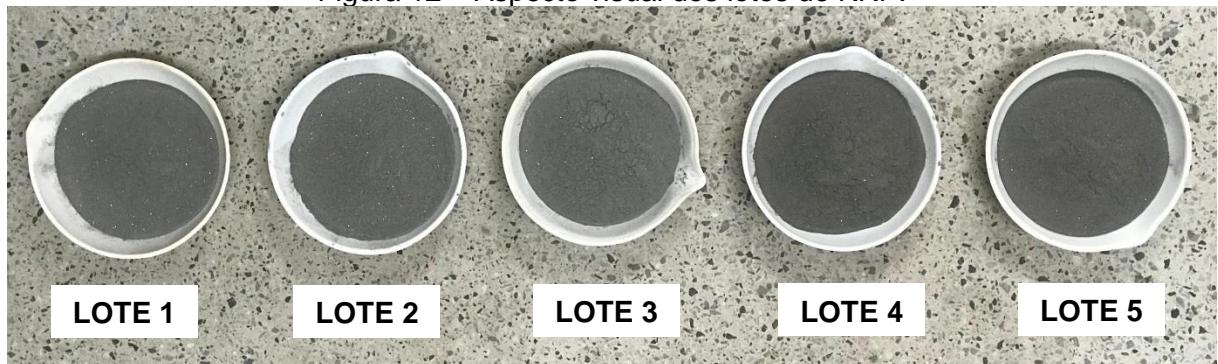
Tabela 5 – Data da coleta de cada lote de KRP utilizado na pesquisa.

Lote de KRP	Data da coleta
Lote 1	21/07/2023
Lote 2	13/09/2023
Lote 3	02/10/2023
Lote 4	21/11/2023
Lote 5	15/12/2023

Fonte: Autora (2024).

Após o recebimento do KRP no laboratório, o material foi submetido à secagem em estufa, a uma temperatura de 100°C, durante um período de 24 horas. Em seguida, o material foi resfriado à temperatura ambiente, armazenado em sacos plásticos e mantido na câmara seca até sua utilização nos ensaios de caracterização e moldagem das argamassas. Na Figura 12 é possível observar o aspecto visual dos cinco lotes de KRP utilizados na pesquisa, após o processo de secagem na estufa.

Figura 12 – Aspecto visual dos lotes de KRP.



Fonte: Autora (2024).

4.1.3 Escória granulada de alto-forno

A escória granulada de alto-forno (EGAF) utilizada nessa pesquisa também foi fornecida pela Mizu Cimentos. Não foi necessário realizar etapas de moagem do material, pois ele já se encontrava moído (Figura 13) com uma finura adequada para ser utilizado como adição mineral no cimento. A EGAF, em seu estado bruto, é fornecida para a Mizu Cimentos pela ArcelorMittal Tubarão.

Figura 13 – Amostra da EGAF utilizada na pesquisa.



Fonte: Autora (2024).

4.1.4 Agregado miúdo

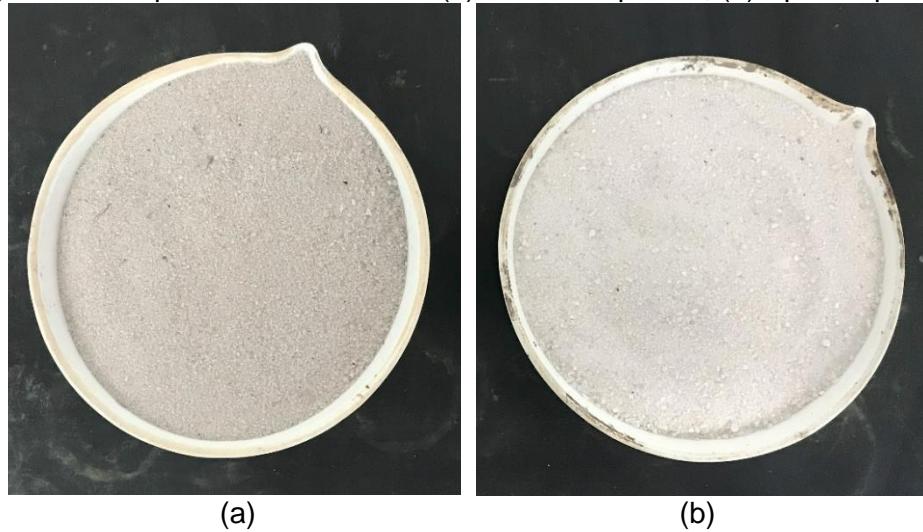
O agregado miúdo utilizado para produção das argamassas foi uma areia quartzosa de cava proveniente da cidade de Linhares, Espírito Santo, a qual estava disponível no LEMAC. Para eliminação da matéria orgânica e da umidade presentes na areia, o agregado foi submetido a um processo de queima a 450°C na mufla, representada na Figura 14, durante uma hora. Em seguida, o material foi resfriado à temperatura ambiente, embalado em sacos plásticos e armazenado até que fosse utilizado na moldagem das argamassas. Na Figura 15, é possível observar a diferença no aspecto visual da areia antes e após a queima.

Figura 14 – Processo de queima da areia na mufla.



Fonte: Autora (2024).

Figura 15 – Aspecto visual da areia. (a) Antes da queima; (b) Após a queima.



Fonte: Autora (2024).

4.1.5 Água

A água utilizada na pesquisa foi a disponível no LEMAC, fornecida pela CESAN (Companhia Espírito Santense de Saneamento), concessionária do município de Vitória, Espírito Santo.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.2.1 Caracterização dos materiais

A caracterização do CP V, do KRP e da EGAF utilizados nesta pesquisa foi realizada por meio dos procedimentos apresentados nos itens a seguir.

4.2.1.1 Composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica permite determinar a distribuição percentual dos diferentes tamanhos de grãos que constituem o material. Trata-se de uma determinação importante, pois influencia diretamente nas propriedades das argamassas produzidas com esse material.

A determinação da composição granulométrica foi realizada nos cinco lotes de KRP avaliados nesta pesquisa. Embora o material se apresente na forma de pó, o objetivo foi avaliar se porcentagem de material retido era significativa. A distribuição granulométrica de agregados miúdos e graúdos é obtida pelo ensaio de peneiramento, conforme a norma NM 248:2001. Foram utilizadas peneiras da série normal com aberturas de 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm . Foram realizadas duas determinações para cada lote de KRP, utilizando-se uma amostra com massa inicial de 300 gramas.

Em seguida, com o fundo do ensaio de análise granulométrica, realizou-se o peneiramento por lavagem, com o objetivo de determinar o teor de material pulverulento, ou seja, a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 μm , conforme a norma NBR 16973:2021. Ressalta-se que a NBR 16973 (ABNT, 2021) estabelece uma massa mínima de 300 gramas de amostra para realização do ensaio; entretanto, como a amostra utilizada foi o fundo do ensaio de composição

granulométrica, a massa foi um pouco inferior. Ao final do ensaio, o teor de material pulverulento foi corrigido considerando a massa inicial de aproximadamente 300 gramas. O resultado final, que permite traçar a curva granulométrica, é a média aritmética de duas determinações.

4.2.1.2 Massa específica

As massas específicas do CP V, EGAF e dos cinco lotes de KRP foram determinadas de acordo com a norma NBR 16605:2017, cujo método é aplicado ao cimento Portland e outros materiais em pó. O ensaio consiste na determinação do volume de líquido deslocado a partir da adição de uma massa conhecida do material no frasco de Le Chatelier (Figura 16). Utilizou-se querosene como líquido na realização do ensaio. Foram realizadas duas determinações para cada amostra ensaiada.

Figura 16 – Frasco volumétrico de Le Chatelier.



Fonte: Autora (2024).

4.2.1.3 Finura

A finura do cimento é uma propriedade crucial para a sua qualidade. Um aumento na finura contribui para um rápido desenvolvimento de resistência inicial, reduz a exsudação e a segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão (NEVILLE, 2016; BAUER, 2019). Sendo assim, a determinação da finura, por meio da superfície específica, é fundamental, pois governa a velocidade de hidratação do cimento, influenciando na qualidade de pastas, argamassas e concretos (BAUER, 2019).

A finura do CP V, EGAF e dos cinco lotes de KRP foi determinada conforme a norma NBR 16372:2015, cujo método se aplica ao cimento Portland e outros materiais em pó. Neste método, mede-se o tempo de percolação de determinado volume de ar através de uma camada de material compactado com dimensões e porosidade definidas (ABNT, 2015). O aparelho utilizado para a realização deste ensaio é indicado na Figura 17.

Figura 17 – Aparelho de permeabilidade Blaine.



Fonte: Autora (2024).

A porosidade da camada foi escolhida por tentativas, até se obter uma camada facilmente compactada. Com a porosidade adequada definida, foram realizadas duas determinações para cada amostra, sendo o resultado final a média delas.

4.2.1.4 Perda ao fogo

A perda ao fogo é uma medida utilizada para determinar a quantidade de massa que um material perde quando aquecido a uma temperatura específica, em função da decomposição de componentes voláteis. A perda ao fogo de cimentos sem adição está em torno de 1% ou menos, enquanto valores maiores indicam a presença de fíller calcário (SCHANKOSKI, 2022). Conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3 deste trabalho, o limite da perda ao fogo aumenta em função do aumento do limite de material carbonático na composição dos cimentos.

A determinação da perda ao fogo do CP V, EGAF e dos cinco lotes de KRP foi realizada conforme a norma NBR 17086-6:2023. Esta norma estabelece dois procedimentos, A e B, sendo o procedimento A para determinação da perda ao fogo em cimentos sem adição de EGAF, e o procedimento B se aplica a cimentos com adições de EGAF (ABNT, 2023c). Para o CP V e os cinco lotes de KRP, utilizou-se o procedimento A, enquanto para a EGAF, utilizou-se o procedimento B. Foram realizadas duas determinações para cada amostra ensaiada.

No procedimento B, é necessário realizar uma correção em função da oxidação do sulfeto presente na EGAF. Para isso, determinou-se a variação do teor do trióxido de enxofre, conforme método descrito na NBR 17086-5:2023, na amostra calcinada e em uma amostra original de EGAF.

4.2.1.5 Resíduo insolúvel

O cimento Portland puro, por natureza, é um material solúvel em ácido clorídrico; entretanto, alguns tipos de adições minerais não são (SCHANKOSKI, 2022). O resíduo insolúvel, portanto, permite determinar a porcentagem desse material que é resistente ao ácido clorídrico.

A determinação do resíduo insolúvel do CP V, EGAF e dos cinco lotes de KRP foi realizada conforme NBR 17086-4:2023. Foram realizadas duas determinações para cada amostra ensaiada. Vale ressaltar que essa norma não é aplicável a cimentos com adição de materiais pozolânicos.

4.2.2 Preparo, moldagem e cura dos corpos de prova

Com o objetivo de avaliar se o KRP pode atuar como um ativador alcalino para o cimento Portland composto com escória de alto-forno (CP II-E) e o cimento Portland de alto-forno (CP III), foram preparados em laboratório dois cimentos de referência. O primeiro contendo 65% de CP V e 35% EGAF, e o segundo contendo 25% de CP V e 75% EGAF, ambas as proporções em massa. Para cada um dos cimentos de referência, foi incorporado 15% de KRP em substituição a EGAF, em massa, para cada um dos cinco lotes de KRP caracterizado. A composição dos cimentos

ensaiados, bem como a nomenclatura adotada para cada um deles, está indicada na Tabela 6.

O teor de 15% de KRP foi adotado com base na revisão de literatura e considerando também os resultados preliminares de pesquisas experimentais, ainda não publicadas, realizadas sob orientação do professor Ronaldo Pilar. Os resultados indicam que o teor de 15% é o que conduz a melhores resultados em termos de desempenho mecânico.

Tabela 6 – Composição dos cimentos ensaiados.

Mistura	Nomenclatura
100% CP V	REF – CPV
65% CP V + 35% EGAF	REF – CPII-E
25% CP V + 75% EGAF	REF – CPIII
65% CP V + 20% EGAF + 15% LOTE 1 KRP	L1 – CPII-E
25% CP V + 60% EGAF + 15% LOTE 1 KRP	L1 – CPIII
65% CP V + 20% EGAF + 15% LOTE 2 KRP	L2 – CPII-E
25% CP V + 60% EGAF + 15% LOTE 2 KRP	L2 – CPIII
65% CP V + 20% EGAF + 15% LOTE 3 KRP	L3 – CPII-E
25% CP V + 60% EGAF + 15% LOTE 3 KRP	L3 – CPIII
65% CP V + 20% EGAF + 15% LOTE 4 KRP	L4 – CPII-E
25% CP V + 60% EGAF + 15% LOTE 4 KRP	L4 – CPIII
65% CP V + 20% EGAF + 15% LOTE 5 KRP	L5 – CPII-E
25% CP V + 60% EGAF + 15% LOTE 5 KRP	L5 – CPIII

Fonte: Autora (2024).

Para a produção das argamassas, adotou-se o traço de referência da NBR 7215:2019, composto de uma parte de aglomerante, três partes de areia e relação água/aglomerante de 0,48 (ou seja, 1:3:0,48, em massa). Os aglomerantes foram pesados previamente nas proporções determinadas e homogeneizados manualmente a seco. Em seguida, a argamassa foi preparada com o auxílio de um misturador mecânico manual (Figura 18), seguindo o procedimento de mistura padronizado pela referida norma. Imediatamente após a mistura, foram moldados os corpos de prova (CPs) cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, e, na sequência, os moldes foram levados para a câmara úmida, com a face superior protegida por uma placa, para a cura inicial ao ar por um período de 24 horas.

Optou-se pela utilização do misturador manual ao invés da argamassadeira de bancada especificada na NBR 7215:2019 devido à limitação de volume deste equipamento. Para moldar a quantidade necessária de corpos de prova para o rompimento nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, seria necessário realizar três misturas. Com o uso do misturador mecânico manual, foi possível preparar toda a argamassa de uma só vez, evitando variações no desenvolvimento de resistência à compressão nos CPs devido a diferenças no processo de moldagem.

Figura 18 – Misturador manual e recipiente utilizados para moldagem das argamassas.



Fonte: Autora (2024).

Decorrido o período de cura inicial, os CPs foram desmoldados e identificados. Em seguida, deu-se seguimento ao procedimento de cura por meio da imersão dos CPs em tanques com água saturada de cal, dentro da câmara úmida, conforme Figura 19, até o rompimento nas respectivas idades de ensaio.

Figura 19 – Tanque de cura dos corpos de prova com água saturada de cal.



Fonte: Autora (2024).

4.2.3 Resistência à compressão axial

O desempenho mecânico dos cimentos foi avaliado conforme o procedimento estabelecido na NBR 7215:2019. A resistência à compressão axial foi determinada nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, sendo ensaiados quatro corpos de prova em cada idade. Antes do rompimento dos CPs na prensa, as extremidades dos corpos de prova foram retificadas (Figura 20), com o intuito de obter uma superfície lisa para distribuição uniforme da carga aplicada axialmente.

Figura 20 – Aspecto visual dos corpos de prova após a retífica.



Fonte: Autora (2024).

Para cada corpo de prova, foram realizadas duas medidas do diâmetro com auxílio de um paquímetro digital, para obtenção da área nominal média da seção. Para obtenção da força de ruptura, utilizou-se uma Prensa Universal Amsler (Figura 21), com aquisição de dados analógica e capacidade de 50 toneladas à compressão, disponível no LEMAC. Por fim, foram realizadas as determinações individuais e posterior cálculo da resistência média e do desvio máximo relativo, conforme NBR 7215. Além disso, também se determinou o desvio padrão para cada idade de ruptura, considerando as resistências dos 4 CPs.

Figura 21 – Prensa universal utilizada no ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Autora (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

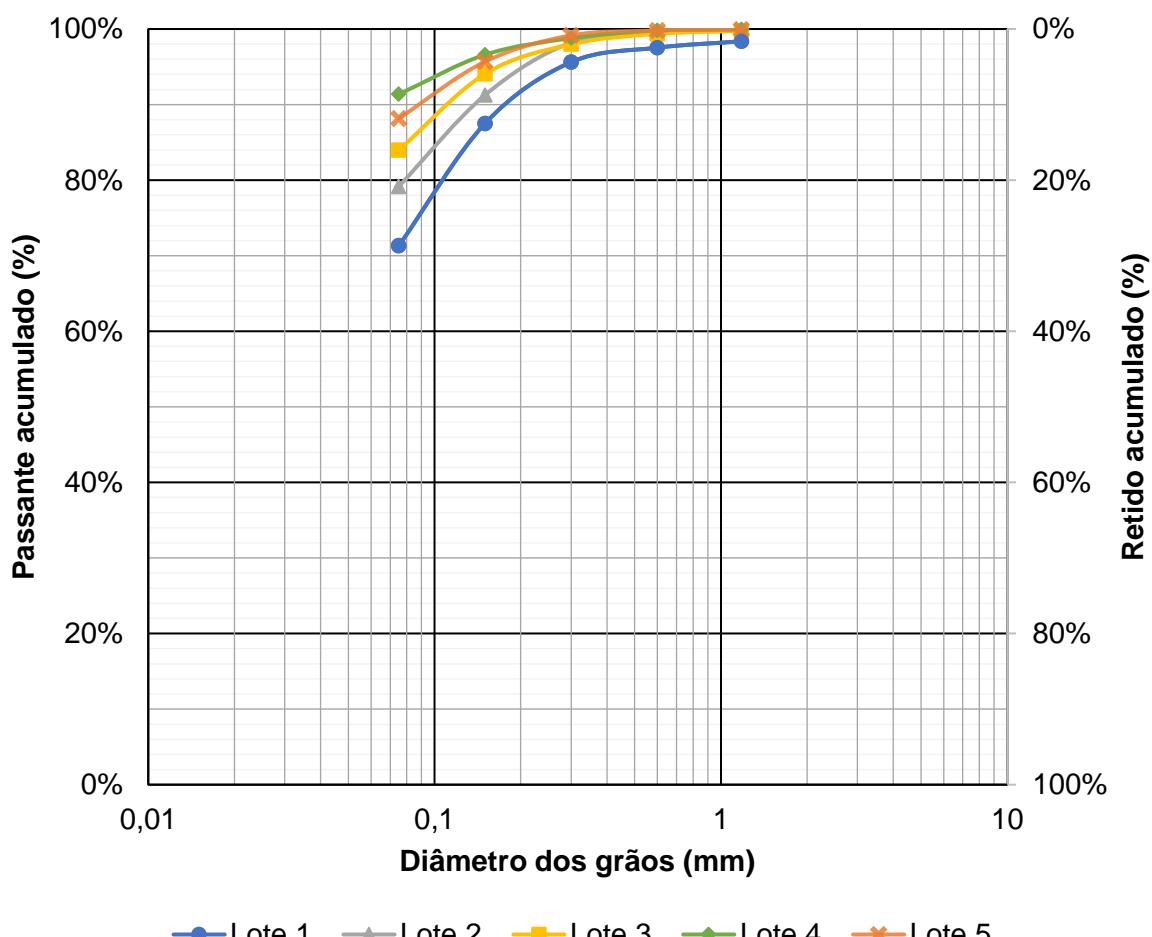
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

5.1.1 Composição granulométrica

A Figura 22 apresenta as curvas granulométrica dos cinco lotes de KRP. Observa-se uma pequena variação nas porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de 1,18 mm, 0,6 mm e 0,3 mm. Entretanto, nas peneiras de 0,15 mm e 0,075 mm, a variação foi mais significativa.

Conforme a NM 248:2001, a dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal da malha da peneira na qual o material apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5%. Analisando os resultados do ensaio, obteve-se uma dimensão máxima característica de 0,3 mm para os lotes 1, 2 e 3, e de 0,15 mm para os lotes 4 e 5.

Figura 22 – Curvas granulométricas dos cinco lotes de KRP.



Fonte: Autora (2024).

Os resultados do ensaio de determinação do material fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem, também representados nas curvas granulométricas dos cinco lotes de KRP, são indicados na Tabela 7. Essa determinação é importante, pois uma quantidade excessiva de grãos maiores que 75 μm no cimento pouco contribui para o processo de hidratação e desenvolvimento de resistência (NEVILLE, 2016).

Tabela 7 – Material mais fino que a peneira de 75 μm , por lavagem, dos cinco lotes de KRP.

Lote	Determinação 1 (%)	Determinação 2 (%)	Material mais fino que a peneira 75 μm (%)
Lote 1	70,8	71,9	71
Lote 2	79,9	78,4	79
Lote 3	83,7	84,2	84
Lote 4	91,2	91,5	91
Lote 5	88,2	88,1	88
Valor médio dos cinco lotes (%)			83
Desvio padrão			8

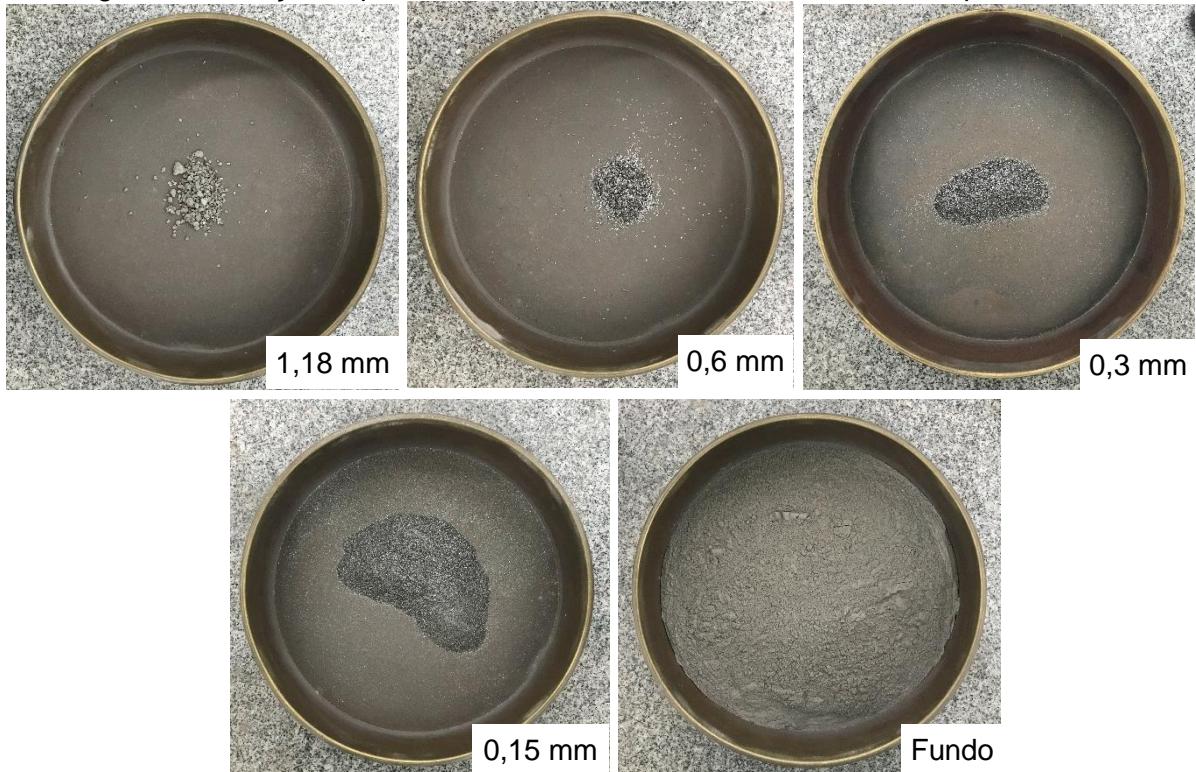
Fonte: Autora (2024).

Dentre os cinco lotes avaliados, o que apresenta maior porcentagem passante na peneira de 75 μm é o lote 4, com 91%. Em contrapartida, o lote 1, com o menor percentual, tem 71% do material passante na peneira de 75 μm . O valor médio para os cinco lotes foi de 88%, com desvio padrão de 8%. Considerando essa média, 12% do material é maior do que a abertura da peneira #200. Vale ressaltar que a NBR 16697:2018 estabelece um limite máximo de 10% e 8% de material retido na peneira 75 μm para os cimentos CPII-E 40 e CP III 40, respectivamente. Assim, ainda que a variação encontrada seja considerável, como a proporção de KRP na incorporação ao cimento é de 15% da massa total, essa limitação não impede a utilização do material sem etapas adicionais de moagem.

Na Figura 23 é possível observar as frações típicas encontradas nos lotes de KRP durante o peneiramento para determinação da composição granulométrica. Na Figura 24, é possível ver com mais nitidez o aspecto visual da fração retida na peneira de 150 μm . Destaca-se a presença de metais na composição do KRP, evidenciada pelo aspecto metálico dessa fração. Isso ocorre principalmente porque o sistema de despoeiramento, do qual o KRP é capturado, abrange duas operações distintas: o basculamento de escória KR e o basculamento do ferro-gusa em emergência, que é

uma liga metálica no estado líquido. Assim, é esperado encontrar na composição do material uma quantidade significativa de Fe_2O_3 .

Figura 23 – Frações típicas observadas nos lotes de KRP durante o peneiramento.



Fonte: Autora (2024).

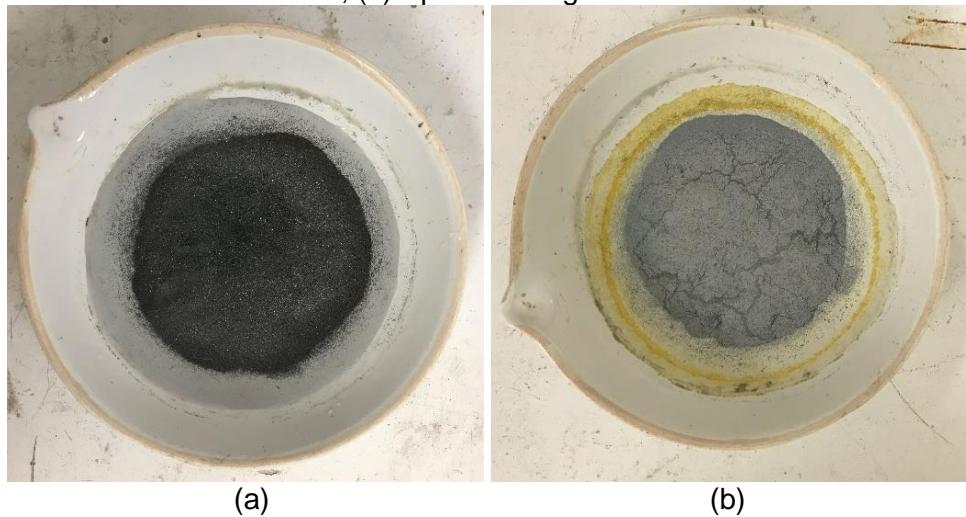
Figura 24 – Aspecto visual típico da fração de KRP retida na peneira de 150 μm .



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 25 observa-se o aspecto visual do KRP após a etapa de peneiramento por lavagem na peneira de 75 μm , antes e depois da secagem na estufa.

Figura 25 – Aspecto visual típico do KRP no peneiramento por lavagem. (a) Antes secagem na estufa; (b) Após a secagem na estufa.



Fonte: Autora (2024).

5.1.2 Massa específica

Os resultados dos ensaios de determinação da massa específica para o CP V e EGAF são apresentados na Tabela 8. Para os cinco lotes de KRP, os resultados estão indicados na Tabela 9.

Tabela 8 – Massa específica do CP V e EGAF.

Material	Determinação 1 (g/cm ³)	Determinação 2 (g/cm ³)	Massa específica média (g/cm ³)
CP V	3,069	3,061	3,06
EGAF	2,905	2,923	2,91

Fonte: Autora (2024).

Tabela 9 – Massa específica dos cinco lotes de KRP.

Lote	Determinação 1 (g/cm ³)	Determinação 2 (g/cm ³)	Massa específica média (g/cm ³)
Lote 1	2,866	2,864	2,87
Lote 2	2,933	2,916	2,92
Lote 3	2,860	2,867	2,86
Lote 4	2,973	2,978	2,98
Lote 5	2,913	2,908	2,91
Valor médio dos cinco lotes (g/cm³)			2,91
Desvio padrão			0,05

Fonte: Autora (2024).

O valor médio da massa específica dos cinco lotes de KRP foi de 2,91 g/cm³, com desvio padrão de 0,05. O mesmo valor de 2,91 g/cm³ foi obtido para a EGAF utilizada nessa pesquisa. Observa-se que não houve variação significativa nas massas específicas entre os lotes de KRP avaliados. Além disso, as massas específicas dos lotes de KRP apresentaram valores próximos à massa específica obtida por outros autores para a escória KR moída 3,01 g/cm³ (CHO *et al.*, 2018) e 3,19 g/cm³ (COSTA *et al.*, 2021).

5.1.3 Finura

O método de peneiramento para determinar o resíduo na peneira de 75 µm não fornece informações sobre os grãos menores que essa abertura, que são cruciais para a hidratação inicial do cimento. Por isso, recomenda-se determinar a finura do cimento, bem como das adições utilizadas na sua composição, pela superfície específica, como no método de Blaine. Esse método permite avaliar a variação relativa da finura dos materiais (NEVILLE, 2016).

Os resultados dos ensaios de determinação da superfície específica do CP V e EGAF são apresentados na Tabela 10. Certificados de qualidade do fabricante do cimento utilizado nesta pesquisa apontam um Blaine maior que 4800 cm²/g para o CP V ARI (MIZU CIMENTOS, 2024). Já segundo a literatura, cimentos de alta resistência inicial possuem superfície específica, determinada pelo método de Blaine, variando de 4500 a 6000 cm²/g (NEVILLE, 2016). Entretanto, o valor obtido a partir do ensaio realizado no laboratório para o CP V ARI utilizado nessa pesquisa foi de 3600 cm²/g. Esse valor, significativamente menor, pode estar relacionado ao tempo decorrido do recebimento do cimento no laboratório até o momento da sua utilização nos ensaios.

Em estudos recentes que utilizaram a escória KR junto com a EGAF para produzir um material cimentício sem a utilização de clínquer Portland, a escória de alto-forno foi utilizada com o Blaine variando de 4000 cm²/g (DU *et al.*, 2022a) a 5040 cm²/g (DU *et al.*, 2022b). Dessa forma, o valor obtido para o Blaine da EGAF utilizada nesta pesquisa, de 3600 cm²/g, é ligeiramente inferior.

Tabela 10 – Superfície específica do CP V e EGAF.

Material	Determinação 1 (cm ² /g)	Determinação 2 (cm ² /g)	Superfície específica média (cm ² /g)
CP V	3514	3592	3550
EGAF	3545	3659	3600

Fonte: Autora (2024).

Para os cinco lotes de KRP, os resultados de superfície específica estão indicados na Tabela 11. O valor médio da superfície específica dos cinco lotes de KRP foi de 2740 cm²/g, com desvio padrão de 265. Com base nos valores apresentados, nota-se que o material não se comporta de forma uniforme em termos de finura.

Tabela 11 – Superfície específica dos cinco lotes de KRP.

Lote	Determinação 1 (cm ² /g)	Determinação 2 (cm ² /g)	Superfície específica média (cm ² /g)
Lote 1	3004	2931	2970
Lote 2	2586	2591	2590
Lote 3	3015	3078	3050
Lote 4	2644	2706	2680
Lote 5	2405	2417	2410
Valor médio dos cinco lotes (cm²/g)			2740
Desvio padrão			265

Fonte: Autora (2024).

O Lote 5 de KRP foi a amostra com o menor valor de finura, registrando 2410 cm²/g. Em contrapartida, o Lote 3 foi o que apresentou o maior valor, com 3050 cm²/g. Este último, juntamente com o Lote 1 (2970 cm²/g), foram os lotes cujas finuras mais se aproximaram da finura do CP V e EGAF utilizados na pesquisa. Entretanto, os valores de finura observados para o KRP, inferiores aos do CP V e EGAF, podem inviabilizar a utilização deste material sem etapas de moagem.

Espera-se que as propriedades do KRP se assemelhem às da escória KR. Resultados de um estudo conduzido por Kuo & Hou (2014) mostram que a escória KR moída e passante na peneira #100, com um Blaine de 3830 cm²/g, pode atuar como ativador alcalino da EGAF, por conter uma grande quantidade de CaO, aumentando o pH da solução e gerando íons OH⁻ na presença de água, rompendo as ligações covalentes da EGAF e iniciando, assim, seu processo de hidratação. Entretanto, para que esse material se solubilize na água, é necessário que ele tenha uma finura adequada.

5.1.4 Perda ao fogo

Os resultados dos ensaios de determinação da perda ao fogo do CP V e EGAF são apresentados na Tabela 12Tabela 10. Os valores da perda ao fogo da EGAF estão corrigidos em função da oxidação do sulfeto presente no material, conforme prescrito no procedimento B da NBR 17086-6:2023.

Tabela 12 – Perda ao fogo do CP V e EGAF.

Material	Determinação 1 (%)	Determinação 2 (%)	Perda ao fogo média (%)
CP V	5,11	5,22	5,17
EGAF	0,09	0,04	0,07

Fonte: Autora (2024).

Certificados de qualidade do fabricante do cimento utilizado nesta pesquisa indicam uma perda ao fogo variando de 2,66% a 4,33% para o CP V ARI (MIZU CIMENTOS, 2024). No ensaio realizado no laboratório, obteve-se uma perda ao fogo de 5,17% para o mesmo cimento. Embora o valor seja superior ao indicado pelo fabricante, está abaixo do limite de 6,5% determinado pela NBR 16697:2018, conforme mostrado na Tabela 3. No CP V, a perda ao fogo observada deve-se à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) presente no filler, utilizado como adição neste tipo de cimento, com teor de até 10% (ABNT, 2018).

A EGAF, por sua vez, não apresenta perda ao fogo, pois é formada durante a produção do ferro-gusa no alto-forno, a temperaturas acima de 1500 °C — temperatura superior àquela utilizada durante o ensaio de perda ao fogo.

Para os cinco lotes de KRP, os resultados de perda ao fogo estão indicados na Tabela 13. O valor médio da perda ao fogo dos cinco lotes de KRP foi de 9,30%, com desvio padrão de 2,70%. Nota-se que os lotes 1, 2 e 3 de KRP apresentaram valores próximos de perda ao fogo. De forma similar, os lotes 4 e 5 também apresentaram valores semelhantes. A diferença entre a perda ao fogo observada para o lote 1, de 12,73%, e a observada para o lote 5, de 6,45%, foi de 6,28%. Ainda que essa diferença, bem como o desvio padrão, tenha sido significativa, essa discrepância entre os resultados não inviabiliza o uso do KRP como material cimentício suplementar. Entretanto, esses resultados podem indicar alterações na composição química do material ao longo do período avaliado.

Tabela 13 – Perda ao fogo dos cinco lotes de KRP.

Lote	Determinação 1 (%)	Determinação 2 (%)	Perda ao fogo média (%)
Lote 1	12,71	12,74	12,73
Lote 2	10,60	10,68	10,64
Lote 3	10,00	10,07	10,03
Lote 4	6,59	6,72	6,65
Lote 5	6,45	6,44	6,45
Valor médio dos cinco lotes (%)			9,30
Desvio padrão			2,70

Fonte: Autora (2024).

Ensaios de análise termogravimétrica realizados por Du *et al.* (2022a) com a escória KR moída indicaram uma perda de massa de aproximadamente 15% ao longo do ensaio, sendo os picos de perda de massa mais expressivos na faixa de temperatura entre 400º e 500ºC, com 4,26%, e na faixa entre 500ºC e 800ºC, com 2,64%. Comparando esses resultados com a perda ao fogo encontrada para os cinco lotes de KRP, observa-se que o KRP apresenta menor perda de massa quando elevado a 950 ± 50 ºC. Ainda assim, esses resultados podem ser indicativos de uma composição química do KRP similar à da escória KR.

Os resultados da análise termogravimétrica, combinados com a calorimetria exploratória diferencial, indicam que a perda de massa entre 400ºC e 500ºC está relacionada à decomposição do Ca(OH)₂. Segundo Du *et al.* (2022a), a escória KR moída contém cerca de 21% de hidróxido de cálcio.

5.1.5 Resíduo insolúvel

Os resultados dos ensaios de determinação do resíduo insolúvel do CP V e da EGAF são apresentados na Tabela 14. Certificados de qualidade do fabricante do cimento utilizado nesta pesquisa indicam um teor de resíduo insolúvel de até 1,22% para o CP V ARI (MIZU CIMENTOS, 2024). No ensaio realizado no laboratório, obteve-se um resíduo insolúvel de 0,88% para o mesmo cimento. Ambos os valores estão abaixo do limite de 3,5% determinado pela NBR 16697:2018, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 14 – Resíduo insolúvel do CP V e EGAF.

Material	Determinação 1 (%)	Determinação 2 (%)	Resíduo insolúvel médio (%)
CP V	0,87	0,90	0,88
EGAF	0,08	0,09	0,09

Fonte: Autora (2024).

Para os cinco lotes de KRP, os resultados de resíduo insolúvel estão indicados na Tabela 15. O valor médio do resíduo insolúvel dos cinco lotes de KRP foi de 8,14%, com desvio padrão de 3,02%. Vale ressaltar que os valores obtidos nas duas determinações para cada lote de KRP não atendem ao critério de repetibilidade da NBR 17086-4:2023, que estabelece uma diferença máxima de 0,11 entre dois resultados individuais. Entretanto, como esse procedimento não é normatizado especificamente para este material, os resultados foram considerados aceitáveis, apesar dessa variação.

Tabela 15 – Resíduo insolúvel dos cinco lotes de KRP.

Lote	Determinação 1 (%)	Determinação 2 (%)	Resíduo insolúvel médio (%)
Lote 1	5,96	5,65	5,80
Lote 2	5,30	5,66	5,48
Lote 3	7,93	7,76	7,84
Lote 4	13,14	12,87	13,01
Lote 5	8,42	8,67	8,54
Valor médio dos cinco lotes (%)			8,14
Desvio padrão			3,02

Fonte: Autora (2024).

Nota-se que os lotes 1 e 2 de KRP apresentaram valores próximos de resíduo insolúvel, sendo o lote 2 o que apresentou menor valor, com 5,48%. Da mesma forma, os lotes 3 e 5 também apresentaram valores semelhantes. Já o lote 4, por sua vez, apresentou o maior valor de todos os lotes, com 13,01% de resíduo insolúvel. A diferença entre o teor de resíduo insolúvel observado para o lote 2 e o observado para o lote 4 foi de 7,53%. Esses resultados também são indicativos de alterações na composição química do KRP ao longo do período avaliado, refletindo possíveis variações na concentração de seus compostos principais ou na presença de impurezas.

Dessa forma, a determinação do teor de resíduo insolúvel é importante para verificar impurezas que não participam da reação de hidratação do cimento. Espera-se que quanto maior o teor de resíduo insolúvel, menos o material contribua para o desenvolvimento das propriedades do cimento. Entretanto, apesar de os valores obtidos serem consideravelmente maiores que aqueles encontrados para o CPV, como a proporção de KRP na incorporação ao cimento é de 15% da massa total, esses resultados, por si só, não impedem a utilização do material na produção de cimentos compostos.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Inicialmente, foi avaliada a resistência à compressão do CPV ARI utilizado nesta pesquisa para a produção dos cimentos compostos, com o intuito de verificar seu atendimento aos requisitos de desempenho mecânico da NBR 16697:2018. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 16. Observa-se que as resistências aos 3 e 7 dias foram superiores ao valor mínimo especificado pela referida norma. Vale ressaltar, entretanto, que não foi realizada a determinação da resistência à compressão do CPV ARI ao 1 dia, conforme preconiza a norma, uma vez que essa idade não foi avaliada para os outros cimentos.

Vale destacar também que dos 28 aos 91 dias não houve ganho significativo de resistência, o que era esperado, uma vez que para este tipo de cimento o desenvolvimento de resistência à compressão ocorre nas primeiras idades. Os valores de resistência obtidos para o CPV ARI também serão utilizados como referência para comparação com os resultados obtidos para os outros cimentos avaliados.

Tabela 16 – Resultados de resistência à compressão do cimento CPV ARI utilizado na produção dos cimentos.

Idade (dia)	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	CP 4 (MPa)	Média (MPa)	DRM (%)	Desvio padrão (MPa)	Limite NBR 16697:2018
3	27,0	29,2*	26,6	26,0	26,5	2,1	1,4	≥ 24,0
7	34,3	34,4	34,0	35,5	34,5	2,8	0,7	≥ 34,0
28	42,8	41,2	40,9	41,1	41,5	3,1	0,9	–
91	43,5	43,6	44,0	43,2	43,6	1,0	0,3	–

*Valor descartado da média, conforme NBR 7215:2019.

Fonte: Autora (2024).

Na Tabela 17 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos cimentos CPII-E avaliados nesta pesquisa, juntamente com o desvio relativo máximo (DRM) calculado conforme a NBR 7215:2019, além do desvio padrão considerando as resistências dos quatro CPs para cada idade de ruptura. Na Figura 26, é possível observar graficamente a resistência à compressão média aos 3, 7, 28 e 91 dias para cada cimento CPII-E, com o respectivo desvio padrão.

Para o cimento CPII-E de referência (REF – CPII-E), composto por 65% de CPV e 35% de EGAF, foram obtidas resistências à compressão de 17,7 MPa, 28,6 MPa, 42,3 MPa e 47,1 MPa aos 3, 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Esses valores atendem aos requisitos mecânicos especificados pela NBR 16697:2018 para o cimento CPII-E Classe 40, cujos valores mínimos de resistência à compressão foram apresentados na Tabela 4.

Considerando o desempenho dos cimentos CPII-E com adição de KRP, aos 3 e 7 dias, todos os cimentos atenderam aos requisitos mínimos de 15,0 e 25,0 MPa, respectivamente, estabelecidos para a Classe 40. Aos 28 dias, os valores de resistência dos cimentos L1 – CPII-E (33,9 MPa), L2 – CPII-E (37,1 MPa), L4 – CPII-E (38,4 MPa) e L5 – CPII-E (35,9 MPa) foram superiores ao valor mínimo estabelecido para a classe de resistência 32 MPa — uma classe inferior à encontrada para o cimento REF – CPII-E. Somente o cimento L3 – CPII-E (41,2 MPa) apresentou, aos 28 dias, resistência à compressão superior ao valor mínimo estabelecido para a classe de maior resistência (40 MPa), desempenho equivalente ao do cimento de referência.

Aos 91 dias, a NBR 16697:2018 não estabelece valor mínimo para a resistência à compressão. Entretanto, o desempenho observado aos 28 dias se manteve. Aos 91 dias, os valores de resistência dos cimentos L1 – CPII-E (43,1 MPa), L2 – CPII-E (44,5 MPa), L4 – CPII-E (43,8 MPa) e L5 – CPII-E (44,9 MPa) foram inferiores ao valor observado para o cimento REF – CPII-E. Somente o cimento L3 – CPII-E (47,9 MPa) apresentou, aos 91 dias, resistência à compressão equivalente ao do cimento de referência.

Dentre os cinco lotes de KRP avaliados, o lote 3 foi o que apresentou a maior superfície específica, com 3050 cm²/g. Esse fator pode justificar o seu desempenho superior na composição do cimento CPII-E em comparação com os outros lotes.

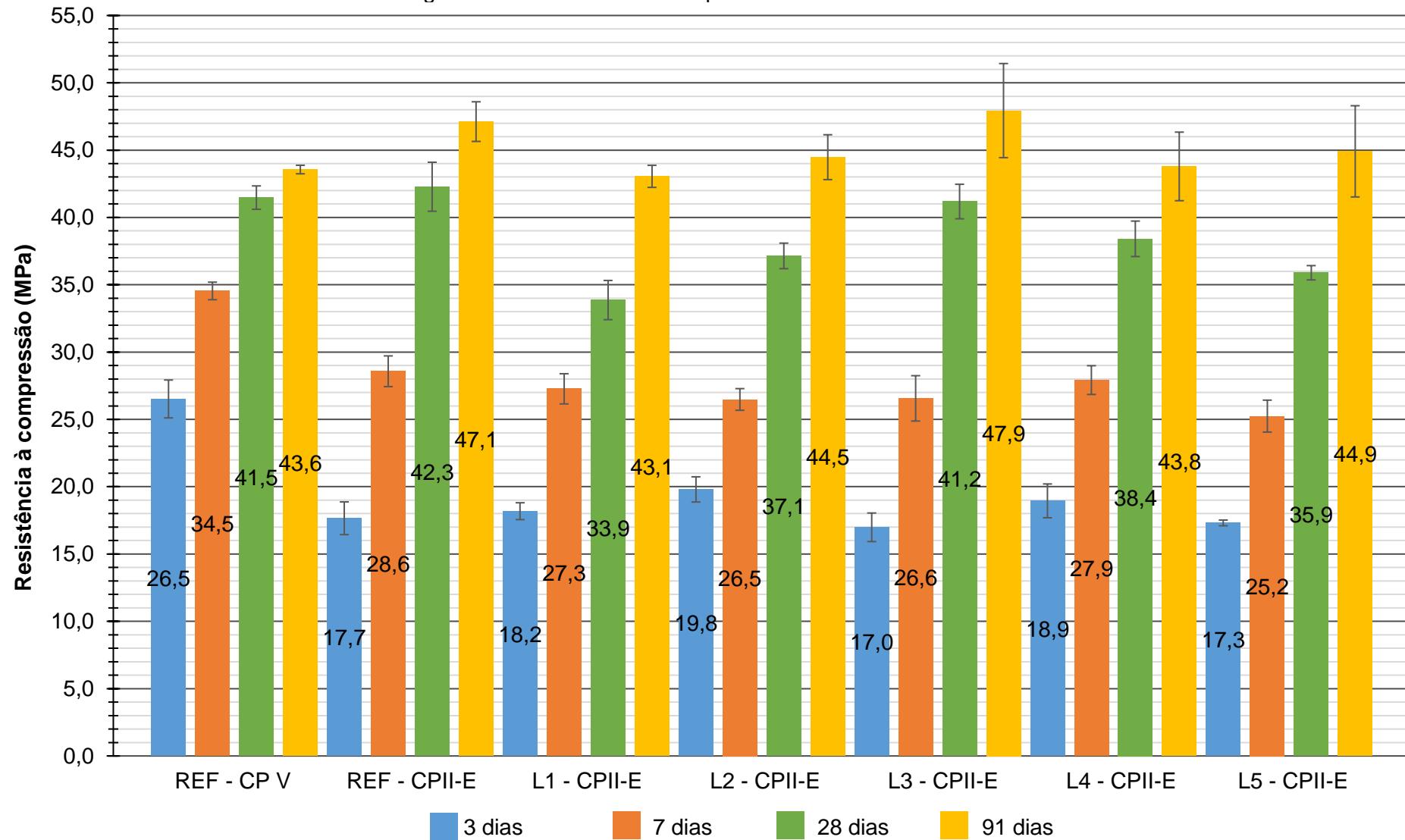
Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão dos cimentos CPII-E.

Idade (dia)	CPs	REF – CPII-E	L1 – CPII-E	L2 – CPII-E	L3 – CPII-E	L4 – CPII-E	L5 – CPII-E
3	CP 1	17,7	18,5	21,0	16,5	19,0	17,2
	CP 2	17,3	18,0	18,7	18,9*	19,8	17,6
	CP 3	18,0	17,4	19,7	17,5	18,0	17,2
	CP 4	20,0*	18,8*	19,8	16,9	16,9*	17,3
	Média (MPa)	17,7	18,2	19,8	17,0	18,9	17,3
	DRM (%)	1,9	4,2	5,9	3,1	5,0	1,8
	Desvio padrão (MPa)	1,2	0,6	0,9	1,1	1,3	0,2
	CP 1	27,1	27,2	26,0	25,0	27,1	26,6
	CP 2	29,6	26,9	27,1	27,3	27,2	24,5
7	CP 3	28,2	26,2	25,6	27,4	29,4	24,1
	CP 4	29,4	28,8	27,2	24,0*	28,0	25,8
	Média (MPa)	28,6	27,3	26,5	26,6	27,9	25,2
	DRM (%)	5,0	5,7	3,4	5,8	5,2	5,5
	Desvio padrão (MPa)	1,1	1,1	0,8	1,7	1,1	1,2
	CP 1	42,7	34,3	37,4	42,2	37,0	36,3
	CP 2	41,3	31,1*	35,9	41,4	38,7	36,2
	CP 3	38,9*	33,2	38,2	41,8	37,8	35,1
	CP 4	42,8	34,1	37,1	39,3	40,1	35,9
28	Média (MPa)	42,3	33,9	37,1	41,2	38,4	35,9
	DRM (%)	2,4	2,0	3,3	4,5	4,4	2,1
	Desvio padrão (MPa)	1,8	1,5	0,9	1,3	1,3	0,5
	CP 1	45,6	42,5	45,3	49,4	44,5	46,3
	CP 2	47,6	42,8	46,3	48,7	45,0	39,2*
	CP 3	48,9	42,7	43,8	45,7	41,8	42,3
	CP 4	46,4	44,3	42,5	41,8*	39,6*	46,1
	Média (MPa)	47,1	43,1	44,5	47,9	43,8	44,9
	DRM (%)	3,8	2,8	4,4	4,8	4,6	5,7
91	Desvio padrão (MPa)	1,5	0,8	1,7	3,5	2,5	3,4

*Valor descartado da média, conforme NBR 7215:2019.

Fonte: Autora (2024).

Figura 26 – Resistência à compressão dos cimentos CPII-E.

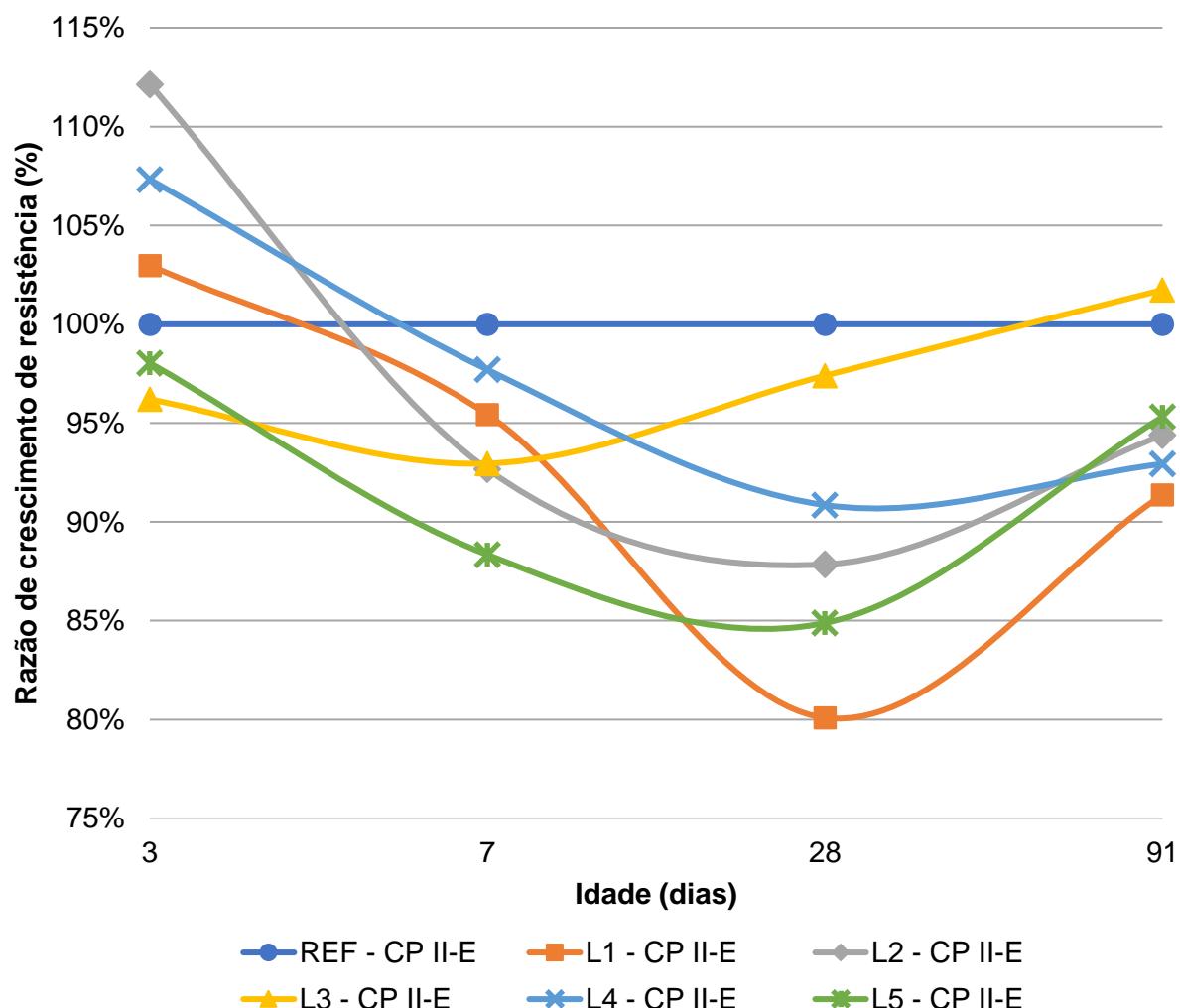


Fonte: Autora (2024).

Ao considerar a evolução da resistência à compressão dos cimentos CPII-E com adição de KRP ao longo de 91 dias, verificou-se um aumento contínuo da resistência. Entretanto, constatou-se também que os resultados obtidos para cada cimento com KRP foram diferentes, apesar de ser possível identificar uma tendência de aumento de resistência similar, o que indica que as características do lote de origem do coproduto interferiram nas propriedades mecânicas do cimento.

Para avaliar o efeito da incorporação de cada um dos cinco de lotes de KRP, em substituição a 15% do teor de EGAF, considerando a massa total do aglomerante, os resultados obtidos para os cimentos CPII-E foram comparados com o desempenho do cimento REF – CPII-E. A Figura 27 ilustra a taxa de desenvolvimento da resistência à compressão dos cimentos, assumindo-se que a resistência à compressão do cimento REF – CPII-E foi fixada em 100%.

Figura 27 – Razão de crescimento da resistência à compressão dos cimentos CPII-E.



Fonte: Autora (2024).

Aos 3 dias, o cimento L3 – CPII-E apresentou a menor resistência relativa (96%), enquanto o cimento L2 – CPII-E apresentou a maior resistência relativa (112%). Os cimentos L1, L4 e L5 – CPII-E apresentaram resistências relativas de 103%, 107% e 98%, respectivamente.

Aos 7 dias, todos os cimentos com KRP tiveram uma redução na resistência em comparação com o cimento REF – CPII-E, sendo o L5 – CPII-E o que apresentou o menor valor, 88%. Vale ressaltar que o lote 5 de KRP foi o que apresentou menor finura Blaine dentre os lotes avaliados, com 2410 cm²/g. Os cimentos L1, L2, L3 e L4 – CPII-E apresentaram resistências relativas de 95%, 93%, 93% e 98%, respectivamente.

Aos 28 dias, a tendência de redução continuou para os cimentos L1, L2, L4 e L5 – CPII-E, alcançando 80%, 88%, 91% e 85%, respectivamente, da resistência do cimento adotado como referência. É importante destacar que o lote 1 de KRP foi o que apresentou menor valor de material mais fino que a peneira de 75 µm, 71%, o que pode justificar seu desempenho inferior na composição do cimento CPII-E aos 28 dias. Já para o L3 – CPII-E, observa-se um comportamento diferente, mantendo-se próximo de 97% do valor de resistência do REF – CPII-E, indicando maior ganho de resistência dentre os cimentos avaliados.

Aos 91 dias, observa-se uma recuperação na resistência relativa para todos os cimentos com KRP, sendo o L3 – CPII-E o que apresentou maior valor, 102%. Os cimentos L1, L2, L4 e L5 – CPII-E alcançaram, ao fim do período avaliado, 91%, 94%, 93% e 95%, respectivamente, da resistência do cimento de referência.

Observa-se que, aos 91 dias, o efeito da finura no desenvolvimento de resistência à compressão é minimizado, com todos os lotes apresentando, no mínimo, 90% da resistência do cimento REF – CPII-E. Sendo assim, é possível afirmar que a finura do KRP tem maior influência até os 28 dias de idade.

Ressalta-se também que, para avaliar a influência da finura, é necessário considerar tanto a porcentagem de material mais fino que a peneira de 75 µm quanto a superfície específica. Um exemplo disso é o lote 1 de KRP, que, apesar de ter uma finura de 2970 cm²/g, apresentou apenas 71% de material passante nessa peneira, resultando, ao final dos 91 dias, no menor desenvolvimento de resistência na composição do CPII-

E. Entretanto, o lote 5 de KRP, que apresentou a menor superfície específica dentre os cinco lotes avaliados, 2410 cm²/g, teve desempenho superior na incorporação ao CPII-E aos 91 dias quando comparado ao L1 – CPII-E, o que pode ser justificado pela maior porcentagem de material pulverulento, 88%.

Conclui-se que a resistência dos cimentos CPII-E com adição de KRP tende a diminuir até os 28 dias, seguida por uma recuperação até os 91 dias, indicando que o material contribui para o desenvolvimento de resistência. Esse resultado está alinhado ao estudo conduzido por Lee *et al.* (2016), que avaliou a utilização da escória de dessulfurização (cuja composição química é similar à da escória KR) como ativador para a EGAF. Concluiu-se que a ação constante da escória de dessulfurização como ativador, que induz as reações de hidratação da EGAF, é observada mesmo após um longo período de 910 dias (LEE *et al.*, 2016).

O cimento L3 - CPII-E apresentou desempenho mais estável e superior ao longo do tempo, tanto aos 28 dias quanto aos 91 dias, em comparação aos outros lotes.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos cimentos CPIII avaliados nesta pesquisa, juntamente com o DRM calculado conforme a NBR 7215:2019, além do desvio padrão considerando as resistências dos quatro CPs para cada idade de ruptura. Na Figura 28, é possível observar graficamente a resistência à compressão média aos 3, 7, 28 e 91 dias para cada cimento CPIII, com o respectivo desvio padrão.

Para o cimento CPIII de referência (REF – CPIII), composto por 25% de CPV e 75% de EGAF, foram obtidas resistências à compressão de 13,2 MPa, 24,7 MPa, 40,0 MPa e 43,9 MPa aos 3, 7, 28 e 91 dias, respectivamente. Esses valores atendem aos requisitos mecânicos especificados pela NBR 16697:2018 para o cimento CPIII Classe 40, cujos valores mínimos de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias foram apresentados na Tabela 4. Vale ressaltar, entretanto, que dentre as determinações facultativas apresentadas na referida norma, há a determinação resistência à compressão aos 91 dias. Para um cimento CPIII 40, o valor mínimo estabelecido é de 48,0 MPa — resultado não alcançado para o CPIII de referência produzido em laboratório nesta pesquisa.

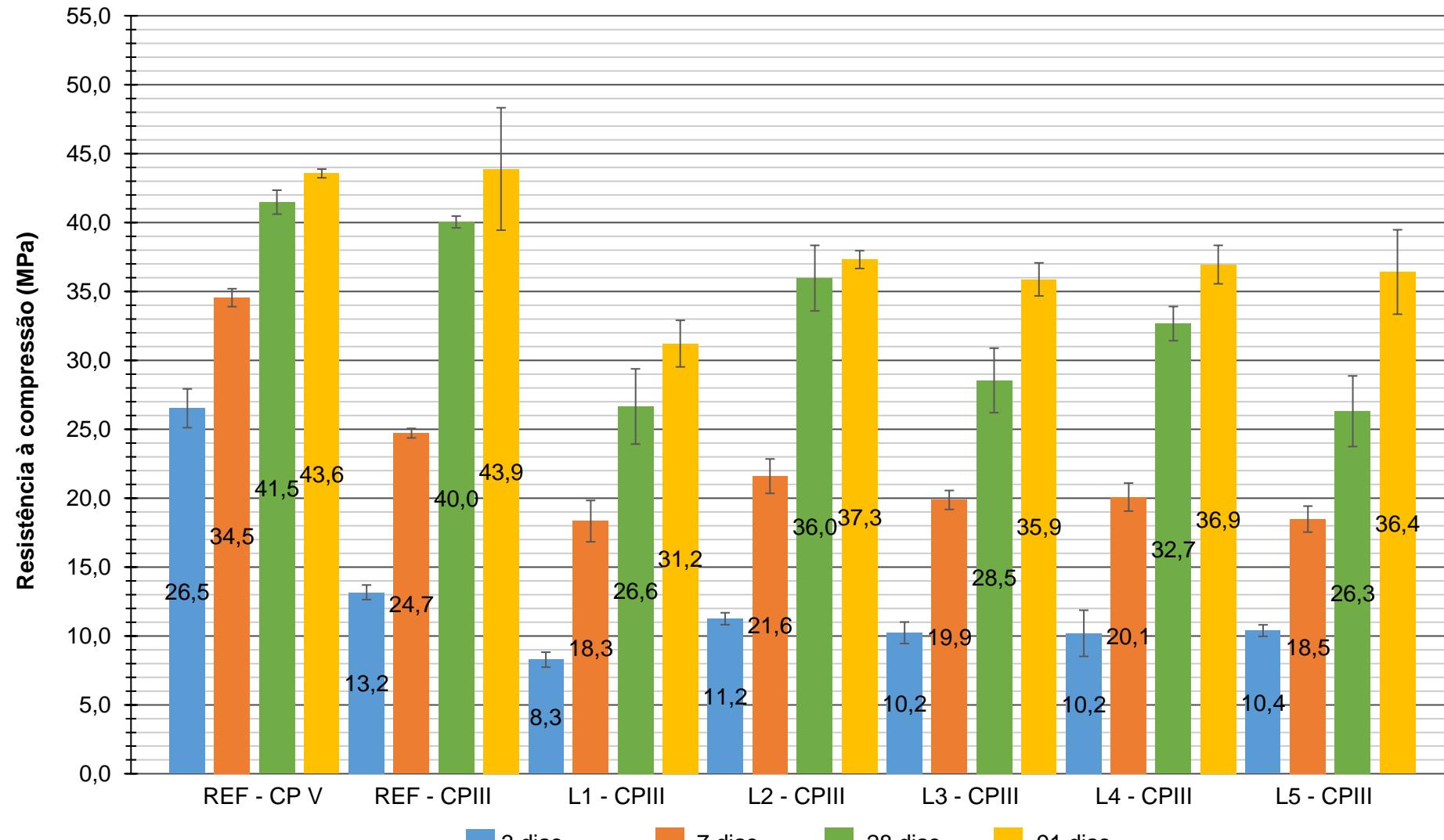
Tabela 18 - Resultados de resistência à compressão dos cimentos CPIII.

Idade (dia)	CPs	REF – CPIII	L1 – CPIII	L2 – CPIII	L3 – CPIII	L4 – CPIII	L5 – CPIII
3	CP 1	12,6	8,2	11,0	10,7	6,9*	10,4
	CP 2	12,8	8,2	10,9	9,8	10,3	10,5
	CP 3	13,5	9,3*	11,2	8,8*	9,7	9,6*
	CP 4	13,7	8,5	11,9	10,2	10,6	10,3
	Média (MPa)	13,2	8,3	11,2	10,2	10,2	10,4
	DRM (%)	4,2	2,4	5,5	4,7	5,2	0,7
	Desvio padrão (MPa)	0,5	0,5	0,4	0,8	1,7	0,4
7	CP 1	24,3	18,8	20,8	19,8	18,3*	18,4
	CP 2	25,2	21,2*	21,3	19,3	20,6	20,4*
	CP 3	24,7	18,2	23,5*	19,5	19,4	18,5
	CP 4	24,7	17,9	22,7	20,8	20,2	18,5
	Média (MPa)	24,7	18,3	21,6	19,9	20,1	18,5
	DRM (%)	1,8	2,7	5,0	5,0	3,5	0,6
	Desvio padrão (MPa)	0,3	1,5	1,2	0,7	1,0	0,9
28	CP 1	39,8	21,6*	37,4	29,7	34,5	26,6
	CP 2	40,5	27,9	35,0	32,9*	32,2	27,1
	CP 3	40,3	26,9	35,4	28,4	31,7	31,2*
	CP 4	39,6	25,2	31,7*	27,5	32,3	25,2
	Média (MPa)	40,0	26,6	36,0	28,5	32,7	26,3
	DRM (%)	1,2	5,3	4,1	4,0	5,6	4,2
	Desvio padrão (MPa)	0,4	2,7	2,4	2,3	1,2	2,6
91	CP 1	44,6	33,9*	37,8	34,6	36,5	34,3
	CP 2	52,2*	30,1	36,7	36,4	35,2	31,1*
	CP 3	41,7	32,6	36,8	35,3	38,0	37,4
	CP 4	45,3	30,9	38,0	37,3	38,1	37,5
	Média (MPa)	43,9	31,2	37,3	35,9	36,9	36,4
	DRM (%)	5,0	4,3	1,7	3,9	4,9	5,9
	Desvio padrão (MPa)	4,4	1,7	0,6	1,2	1,4	3,1

*Valor descartado da média, conforme NBR 7215:2019.

Fonte: Autora (2024).

Figura 28 – Resistência à compressão dos cimentos CPIII.



Fonte: Autora (2024).

Considerando o desempenho mecânico dos cimentos CPIII com adição de KRP, aos 3 dias, os cimentos L2, L3, L4 e L5 – CPIII atenderam ao requisito mínimo de 10,0 MPa, estabelecido para a Classe 32. Entretanto, o cimento L1 – CPIII apresentou desempenho inferior, atendendo ao requisito de 8,0 MPa especificado para a Classe 25. Aos 7 dias, apenas os cimentos L2 e L4 – CPIII atenderam ao requisito mínimo de 20 MPa de resistência à compressão para a Classe 32. Os demais cimentos tiveram desempenho superior ao valor de 15,0 MPa, estabelecido para a Classe 25.

Aos 28 dias, os valores de resistência dos cimentos L2 – CPIII (36,0 MPa) e L4 – CPIII (32,7 MPa) foram superiores ao valor mínimo estabelecido para a classe de resistência 32 MPa, uma classe inferior à encontrada para o cimento REF – CPIII. Os demais cimentos, L1 – CPIII, L3 – CPIII e L5 – CPIII apresentaram, respectivamente, 26,6 MPa, 28,5 MPa e 26,3 MPa, enquadrando-se na menor classe de resistência, desempenho muito inferior ao observado para o cimento de referência.

Aos 91 dias, o desempenho inferior observado aos 28 dias para os cimentos com adição de KRP se manteve, com nenhum dos cimentos apresentando resistência à compressão equivalente à do REF – CPIII. Os resultados obtidos para os cimentos L1, L2, L3, L4 e L5 – CPIII aos 91 dias foram, respectivamente, 31,2 MPa, 37,3 MPa, 35,9 MPa, 36,9 MPa e 36,4 MPa. Aos 91 dias, a NBR 16697:2018 estabelece, para a Classe 25, um valor mínimo de resistência à compressão de 32 MPa, valor alcançado por todos os cimentos, exceto o L1 – CPIII.

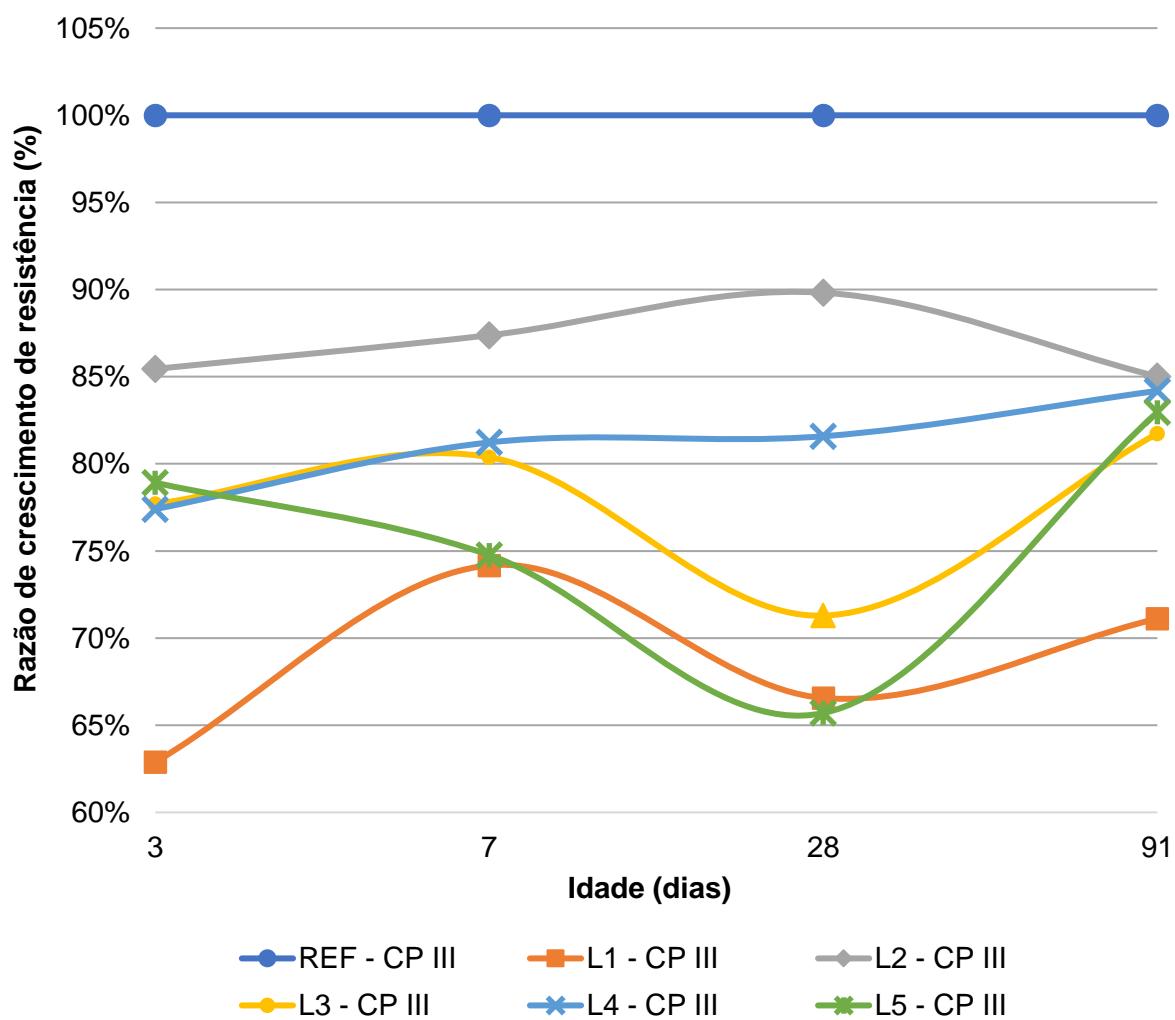
Ainda que o cimento de referência, REF – CPIII, também não tenha alcançado o valor mínimo de resistência aos 91 dias estabelecido pela norma, observa-se que o desempenho dos cimentos com adição de KRP foi muito inferior ao valor de 43,9 MPa.

De modo geral, a incorporação do lote 2 de KRP na composição do CPIII foi a que apresentou melhor desempenho. Esse lote foi o que apresentou menor teor de resíduo insolúvel, com 5,48%. Sabe-se que o resíduo insolúvel indica principalmente a presença de impurezas que não participam das reações de hidratação do cimento. Assim, esse parâmetro é crucial para garantir a qualidade do material. Entretanto, não é possível afirmar que esse fator justifica o desempenho superior do L2 – CPIII quando comparado com os cimentos compostos com outros lotes de KRP.

Ao considerar a evolução da resistência à compressão dos cimentos CPIII com adição de KRP ao longo de 91 dias, verificou-se um aumento contínuo da resistência. Contudo, o ganho de resistência observado para esses cimentos foi muito inferior ao obtido para o cimento REF – CPIII. Além disso, o comportamento não uniforme encontrado para os cimentos com KRP indicam que as características do lote de origem do resíduo interferiram nas propriedades mecânicas do cimento.

Para avaliar o efeito da incorporação de cada um dos cinco de lotes de KRP, em substituição a 15% do teor de EGAF, considerando a massa total do aglomerante, os resultados obtidos para os cimentos CPIII foram comparados com o desempenho do cimento REF – CPIII. A Figura 29 ilustra a taxa de desenvolvimento da resistência à compressão dos cimentos, assumindo-se que a resistência à compressão do cimento REF – CPIII foi fixada em 100%.

Figura 29 – Razão de crescimento da resistência à compressão dos cimentos CPIII.



Fonte: Autora (2024).

Aos 3 dias, o cimento L1 – CPIII apresentou a menor resistência relativa (63%), enquanto o cimento L2 – CPIII apresentou a maior resistência relativa, alcançando 85% da resistência do cimento de referência. Os demais cimentos, L3, L4 e L5 – CPIII, tiveram resistências relativas de 78%, 77% e 79%, respectivamente.

Aos 7 dias, todos os cimentos CPIII com adição de KRP tiveram um aumento na resistência relativa, com exceção do L5 – CPIII, que apresentou 75% da resistência do cimento de referência. O L1 – CPIII foi o que apresentou menor valor, 74%, enquanto os cimentos L2, L3 e L4 – CPIII apresentaram resistências relativas de 87%, 80% e 81%, respectivamente.

O desempenho inferior do cimento L1 – CPIII nas idades iniciais pode ser justificado em função de o material ter 71% de finos que passam pela peneira de 75 μm , sendo este o menor valor considerando os 5 lotes de KRP. Segundo Kuo & Hou (2014), a escória KR atua como um catalisador que ativa o processo de hidratação da EGAF; entretanto, quando não há íons OH- suficientes para completar a reação de forma adequada, observa-se um crescimento de resistência inferior nas idades iniciais. Sendo assim, a finura do material é crucial para que tais reações ocorram de maneira eficiente. A presença de uma porcentagem de finos inferior na composição do L1 – CPIII pode ter impactado negativamente na disponibilidade de íons OH-.

Aos 28 dias, a tendência de redução continuou para os cimentos L1, L3 e L5 – CPIII, alcançando 67%, 71% e 66%, respectivamente, da resistência do cimento adotado como referência. O melhor desempenho foi observado para o L2 – CPIII (90%) seguido pelo L4 – CPIII (82%). Vale ressaltar que, embora o lote 5 de KRP tenha apresentado o pior desempenho na incorporação ao CPIII, quando considerados os cinco lotes desse material, suas características, como a menor superfície específica entre os cinco lotes avaliados, 2410 cm^2/g , e 88% de material mais fino que a peneira de 75 μm , são similares às do lote 2 de KRP que apresentou Blaine de 2590 cm^2/g , e 79% de material mais fino que a peneira #200, e teve desempenho superior na composição do CPIII aos 28 dias. Assim, não é possível afirmar que a finura do material é o fator determinante para o desenvolvimento de resistência aos 28 dias, o que leva a crer que o desempenho mecânico desses cimentos pode estar relacionado com sua composição química.

Aos 91 dias, observa-se uma recuperação na resistência relativa para todos os cimentos com KRP, exceto para o L2 – CPIII, que alcançou 85% da resistência do REF – CPIII; ainda assim, esse foi o melhor desempenho observado. Os demais cimentos, L1, L3, L4 e L5 – CPIII, alcançaram, ao fim do período avaliado, 71%, 82%, 84% e 83%, respectivamente, da resistência do cimento de referência.

Observa-se que, aos 91 dias, bem como nas outras idades avaliadas, a porcentagem de redução na resistência dos cimentos com adição do resíduo é superior aos 15% correspondentes à incorporação do KRP.

Um estudo conduzido por Du *et al.* (2022a), que avaliou a utilização da escória KR, EGAF e gesso de dessulfurização de gases de combustão (FGDG) na produção de um aglomerante sem cimento, encontrou como resultado que um alto valor de EGAF provoca um efeito inibitório da escória KR sobre o desenvolvimento de resistência à compressão. Em função disso, para aumentar as resistências à compressão inicial e tardia da argamassa, o teor de EGAF não deve exceder 55% (DU *et al.*, 2022a).

Cho *et al.* (2018) avaliaram o efeito da adição da escória KR como ativador alcalino da EGAF na resistência à compressão. Encontrou-se que quantidade ideal para a escória KR em é de 10% a 15%; entretanto, foi necessário adicionar gesso às misturas para aumentar a resistência à compressão (CHO *et al.*, 2018).

Assim, considerando que os cimentos CPIII com adição de KRP foram compostos por 25% de CP V, 60% de EGAF e 15% de KRP, é possível que essa proporção não tenha sido adequada. Apesar de os cimentos L1, L3 e L5 – CPIII apresentarem uma recuperação na resistência relativa aos 91 dias, após uma queda significativa aos 28 dias, não é possível afirmar que o KRP contribuiu para o desenvolvimento de resistência — fator que pode estar relacionado com as características físicas e químicas desse material. Contudo, esse resultado é oposto ao obtido para os cimentos CPII-E. Visto que, nos cimentos CPII-E com adição de KRP, ao final dos 91 dias, constatou-se que o KRP contribuiu para o desenvolvimento de resistência.

Considerando os resultados apresentados, o cimento L2 – CPIII manteve uma resistência relativa mais alta e estável durante todas as idades de cura analisadas, indicando um desempenho superior quando comparado aos outros cimentos com adição de KRP. Entretanto, não foi possível identificar uma justificativa para isso.

6 CONCLUSÃO

A incorporação do pó de despoieiramento do basculamento de escória KR e gusa em emergência como material cimentício suplementar, em substituição parcial à escória granulada de alto-forno, é uma alternativa promissora para a produção de cimentos compostos.

A partir da caracterização física e química do material, constatou-se que as propriedades do KRP variaram em função da data de coleta das amostras, o que indica que esse resíduo não se comporta de maneira uniforme. Dentre as principais variações observadas, destaca-se a quantidade de finos que passam pela peneira de 75 μm por lavagem e a superfície específica obtida pelo método de Blaine. Obteve-se como resultado médio para os cinco lotes de KRP avaliados, 83% de material mais fino que a peneira de 75 μm com 8% de desvio padrão, e um Blaine de 2740 cm^2/g com 265 cm^2/g de desvio padrão. Como a finura do material é uma propriedade fundamental para a indústria do cimento, variações nessas propriedades resultam em uma menor eficiência da incorporação do resíduo na produção de cimentos.

A partir dos ensaios de resistência à compressão, observou-se que o KRP contribuiu para o desenvolvimento de resistência nos cimentos CPII-E. Embora tenha sido observado um período inicial de queda na resistência até os 28 dias, quando comparado com o cimento de referência, aos 91 dias foi possível observar o ganho de resistência. O cimento L3 – CPII-E destacou-se por apresentar um desempenho similar ao cimento REF – CPII-E ao longo de todas as idades de cura analisadas, indicando um desempenho superior em comparação com outros cimentos que também continham KRP. Esse resultado sugere que a composição e as características específicas do L3 – CPII-E são mais adequadas para a incorporação de KRP na produção de cimentos compostos. Dentre os cinco lotes de KRP avaliados, o lote 3 foi o que apresentou a maior superfície específica, com 3050 cm^2/g . Esse fator pode justificar o seu desempenho superior na composição do cimento CPII-E em comparação com os outros lotes.

De modo geral, a resistência dos cimentos CPII-E com adição de KRP tende a diminuir até os 28 dias, seguida por uma recuperação até os 91 dias, indicando que o material contribuiu para o desenvolvimento de resistência. O desempenho mecânico à

compressão do cimento L3 – CPII-E atendeu aos requisitos da NBR 16667:2018 estabelecidos para a classe de maior resistência (40 MPa), enquanto os demais cimentos CPII-E atenderam aos requisitos da classe de 32 MPa.

Contudo, nos cimentos CPIII, não foi possível identificar a contribuição do KRP para o desenvolvimento de resistência. Nenhum dos lotes avaliados teve desempenho similar ao do cimento REF – CPIII e não foi possível identificar uma justificativa clara para isso. Aos 28 dias, somente os cimentos L2 – CPIII e L4 – CPIII atenderam aos requisitos de resistência à compressão estabelecidos para a classe de resistência 32 MPa — uma classe inferior à encontrada para o cimento CPIII de referência. Os demais cimentos L1 – CPIII, L3 – CPIII e L5 – CPIII foram enquadrados na classe de menor resistência (25 MPa), o que evidencia o seu desempenho significativamente inferior.

Considerando os ensaios de caracterização química realizados, apesar de ter sido observada uma variação dessas propriedades para os cinco lotes de KRP, não foi possível relacionar essa variação com o desempenho mecânico das argamassas. Entretanto, os resultados encontrados são indicativos de que o material sofre alterações químicas na sua composição ao longo do período avaliado.

Em suma, conclui-se que as propriedades do lote de KRP influenciam no desenvolvimento de resistência à compressão. A variação na porcentagem de finos e na superfície específica dos lotes de KRP pode não apenas afetar as reações de hidratação do cimento, como observado nas diferentes idades de cura, mas também influenciar a disponibilidade de íons essenciais para a ativação alcalina da escória granulada de alto-forno, contribuindo para o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo. Portanto, entender a composição química e física desses materiais é crucial para otimizar seu desempenho na produção de cimentos compostos.

A utilização do KRP como adição ao cimento Portland apresenta potencial para o desenvolvimento de cimentos CPII-E com desempenho mecânico que atenda aos requisitos da NBR 16667:2018 e com menor impacto ambiental, por meio do aproveitamento de um resíduo siderúrgico e evitando o consumo de materiais naturais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para fomentar o uso do KRP como material cimentício suplementar, sugere-se o aprofundamento nas seguintes linhas de pesquisa:

- Avaliar se os cimentos produzidos em laboratório, com adição de KRP, atendem aos demais requisitos químicos e físicos exigidos pela NBR 16697:2018;
- Realizar ensaios de caracterização química nos cinco lotes de KRP avaliados, para verificar se existem variações significativas na composição do material;
- Realiza ensaios de granulometria a laser, com o intuito de avaliar a distribuição das partículas menores que 75 μm , para que seja possível entender melhor como a finura do resíduo influencia no desempenho mecânico;
- Avaliar o uso do KRP em diferentes teores de incorporação para o CPIII, e não apenas em 15% em substituição à escória de alto-forno, para verificar se é possível obter melhores resultados de resistência à compressão;
- Avaliar o uso do KRP moído, com diferentes tempos de moagem, com o intuito de verificar a influência da finura nos resultados de resistência à compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **ABNT NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **ABNT NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **ABNT NBR 17086-4**: Cimento Portland – Análise química – Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2023a.
- _____. **ABNT NBR 17086-5**: Cimento Portland – Análise química – Parte 5: Determinação do trióxido de enxofre. Rio de Janeiro, 2023b.
- _____. **ABNT NBR 17086-6**: Cimento Portland – Análise química – Parte 6: Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2023c.
- ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. São Paulo, 2001.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 6 ed. v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- CHO, B.; CHOI, H. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum Binder. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 436-443, jul. 2016.
- CHO, B.; KOO, K.; CHOI, S. Compressive Strength and Microstructure Properties of Alkali-Activated Systems with Blast Furnace Slag, Desulfurization Slag, and Gypsum. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, Article ID 6123070, dez. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A indústria do aço no Brasil**. Brasília: CNI, 2017.
- COSTA, H. N. et al. Alkaline activation of cement pastes with desulfurization slag. **Cerâmica**, v. 67, p. 399-405, mai. 2021.
- DIEGUEZ, A. C. de O. **Utilização de escória de reator Kambara na composição do cimento Portland**. 2018. 74 f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, 2018.
- DIEGUEZ, A. C. de O. et al. Comparison of Kambara reactor slag with blast furnace slag for Portland cement industry applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, p. 2786-2795, mai. 2019.

DU, H. *et al.* Optimization of the whole-waste binder containing molten iron desulfurization slag from Kambara Reactor for concrete production. **Journal Of Building Engineering**, v. 54, p. 104594, mai. 2022a.

DU, H. *et al.* Application of molten iron desulfurization slag to replace steel slag as an alkaline component in solid waste-based cementitious materials. **Journal Of Cleaner Production**, v. 377, p. 134353, set. 2022b.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2020**. Rio de Janeiro: IAB, 2020. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e sustentabilidade 2023**. Rio de Janeiro: IAB, 2023. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. França: IEA, 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

KIRMSE, O. J. **Estudo do comportamento metalúrgico do reator Kambara através de modelagem física**. 2006. 119 f. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

KUO, W.-T; HOU, T.-C. Engineering properties of alkali-activated binders by use of desulfurization slag and GGBFS. **Construction And Building Materials**, v. 66, p. 229-234, jun. 2014.

LEE, B. *et al.* Compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and freezing/thawing of slag-replaced concrete and cementless slag concrete containing desulfurization slag activator. **Construction And Building Materials**, v. 128, p. 341-348, dez. 2016.

MIZU CIMENTOS. **Produtos**. Disponível em: <https://mizu.com.br/produtos/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

MOURÃO, M. B. **Introdução a siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

SILVA, A. L. V. da C. E.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 4 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

SILVA, A. L. V. da C. E. **Refino dos aços**: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Blucher, 2023.

SCHANKOSKI, R. A. **Notas de aula**. Apostila da disciplina Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 171, p. 107199, mai. 2023.

WU, S. *et al.* Prediction of Endpoint Sulfur Content in KR Desulfurization Based on the Hybrid Algorithm Combining Artificial Neural Network With SAPSO. **IEEE Access**, v. 8, p. 33778-33791, fev. 2020.