

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO VITOR SARCINELLI SILVA

**AVALIAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DE CIMENTOS COMPOSTOS
COM COPRODUTO KR**

**VITÓRIA
2024**

JOÃO VITOR SARCINELLI SILVA

**AVALIAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DE CIMENTOS COMPOSTOS
COM COPRODUTO KR**

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.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rudiele Aparecida
Schankoski

VITÓRIA
2024

JOÃO VITOR SARCINELLI SILVA

**AVALIAÇÕES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DE CIMENTOS COMPOSTOS
COM COPRODUTO KR**

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

Aprovado em: ____ de _____ de 20____

Banca Examinadora

Prof^a Dr^a Rudiele Aparecida Schankoski
Universidade Federal do Espírito Santo

Orientadora

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

Eng. M.e Otávio Gaigher Simões
Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

Dedico esse trabalho ao meu pai e melhor amigo,
José Carlos. Obrigado por me ensinar tanto, sua falta
é sentida todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha orientadora Rudiele por aceitar trabalhar comigo durante o desenvolvimento dessa pesquisa, sempre me mantendo tranquilo apesar de todos os desafios que surgiram durante o processo. Obrigado por todo o ensinamento e atenção.

Agradeço também à ArcelorMittal por disponibilizar os materiais que foram utilizados neste trabalho, reconhecendo a importância que as pesquisas têm para a sociedade.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo pela oportunidade de realizar este projeto de graduação; aos técnicos do LEMAC, por todo o auxílio durante a execução dos experimentos; e aos amigos que fiz durante o curso, João Victor, Luana e Musso, todos vocês têm um lugar especial no meu coração.

Aos familiares que me deram todo o apoio necessário para a realização da graduação.

Agradeço aos amigos que me acompanharam durante essa trajetória que foi a graduação, amigos da ESD, USJ e CA, com destaque para Juliane, Tutu, Juliana, Ryan, David, Angélica, Bibs, Juliana, Mari, João, Julie, Maju e Daniel, sem a amizade de vocês não seria possível finalizar essa etapa na minha vida. Amo todos vocês.

Um agradecimento especial para minha terapeuta Barbara, que me acompanha de perto e me ajuda a superar as dificuldades da vida, principalmente na Universidade.

Por fim, gostaria de deixar um agradecimento especial ao meu pai José Carlos Alves da Silva, por me proporcionar toda a segurança e conforto, que nunca mediou esforços para proporcionar a melhor vida possível. Por ser sempre meu melhor amigo, que esteve comigo nos meus dias mais difíceis, e que me ensinou a ser sempre melhor, me encantando desde muito cedo para a área da engenharia.

Sem todos vocês, nada disso seria possível.

Atenciosamente,

João Vitor Sarcinelli Silva

RESUMO

A indústria siderúrgica gera resíduos durante a produção do aço. Diversos estudos surgem buscando destinar os resíduos para outros setores, que não o descarte. Entre os resíduos é possível destacar o produzido no reator Kambara, processo que retira o enxofre do gusa líquido por meio de agitação mecânica, provocando o contato do líquido com material dessulfurante. Durante esse processo, é coletado o pó em suspensão, coproducto KR, sendo esse o objeto de estudo deste trabalho. O estudo incorporou o KR no cimento, tanto in natura quanto em amostras beneficiadas, utilizando somente a fração fina passante na peneira de 0,075 mm. Para isso, foram coletados dois lotes do material em diferentes datas. Para cada lote foram realizados ensaios de massa específica, finura Blaine, resíduo insolúvel, perda ao fogo, granulometria à laser e fluorescência de raios-X. Buscando avaliar se o coproducto KR pode ser utilizado como adição mineral na produção de cimentos compostos, foram produzidos 3 cimentos de referência. O primeiro, sendo a referência sem substituição, contendo 100% de CP V ARI, o segundo, sendo a amostra de CP II-E, 65% de CP V ARI e 35% de EGAF e o terceiro, a amostra de CP III, 25% de CP V ARI e 75% de EGAF, todas as proporções em massa. Para cada um dos cimentos produzidos, foi incorporado 15% em massa de coproducto KR substituindo a EGAF. Com intuito de avaliar o desenvolvimento das propriedades no estado endurecido das amostras, foram produzidos corpos de prova de argamassas para rompimento em 3, 7, 28 e 91 dias de cura, podendo ser comparados com as referências produzidas. Com os resultados obtidos, foi possível constatar que os cimentos compostos do tipo CP II E apresentaram resultados similares à referência de CP V ARI para as idades de 28 e 91 dias, podendo observar variações médias de 13,8% à 16,8% da referência de CP II E, com exceção das amostras produzidas com lote 1 beneficiado, que obteve redução média de 41,7%. Os cimentos compostos do tipo CP III apresentaram resultados próximos à referência do CP III para as idades para todas as idades, tendo variações médias de 12,6% à 19,9%, com exceção do primeiro lote in natura que teve redução média de 36,7% em todas as idades. Sendo assim, o coproducto KR se demonstrou uma alternativa viável como adição mineral para produção de cimentos compostos juntamente com a EGAF.

Palavras-chave: cimento Portland, escória KR, reator Kambara, resistência à compressão, cimentos compostos.

ABSTRACT

The steel industry generates waste during steel production. Various studies have emerged seeking to allocate these wastes to other sectors rather than disposal. Among the waste products, the one produced in the Kambara reactor stands out; process that removes sulfur from liquid iron through mechanical agitation, facilitating contact between the liquid and desulfurizing material. During this process, suspended powder is collected as a co-product, referred to as KR, which is the focus of this study. The study incorporated KR into cement, both in its natural form and in treated samples, using only the fine fraction passing through a 0.075 mm sieve. Two batches of the material were collected on different dates. For each batch, tests were conducted to determine specific gravity, Blaine fineness, insoluble residue, loss on ignition, laser granulometry, and X-ray fluorescence. To evaluate whether the KR co-product can be used as a mineral addition in the production of composite cements, three reference cements were produced: The first, serving as a reference with no substitution, contained 100% CP V ARI. The second, representing the CP II-E sample, consisted of 65% CP V ARI and 35% GGBFS. The third, the CP III sample, was composed of 25% CP V ARI and 75% GGBFS, all by mass. For each produced cement, 15% by mass of the KR co-product was incorporated, replacing GGBFS. To assess the development of properties in the hardened state of the samples, test specimens of mortars were produced for rupture at 3, 7, 28, and 91 days of curing, allowing comparisons with the reference cements. The results showed that the CP II E composite cements exhibited similar results to the CP V reference at 28 and 91 days, with average variations of 13.8% to 16.8% compared to the CP II E reference, except for samples produced with the treated batch 1, which showed an average reduction of 41.7%. The CP III composite cements displayed results close to the CP III reference for all ages, with average variations of 12.6% to 19.9%, except for the first natural batch, which had an average reduction of 36.7% at all ages. Thus, the KR co-product proved to be a viable alternative as a mineral addition for the production of composite cements alongside GGBFS.

Keywords: Portland cement, KR slag, Kambara reactor, compressive strength, composite cements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de fabricação do Cimento Portland	18
Figura 2: Representação do processo de fabricação do coproduto LD.....	23
Figura 3: Representação do processo de fabricação do coproduto BSSF.	24
Figura 4: Representação do processo de fabricação do coproduto KR.	26
Figura 5: Visão externa do KR.	26
Figura 6: Taxa de dessulfuração no KR.....	26
Figura 7: Comparação entre os processos KR e Tradicional.	27
Figura 8. Frasco Le Chatelier.	31
Figura 9. Aparelho para ensaio de finura Blaine.....	32
Figura 10. Pistão para compactação da amostra.	32
Figura 11. Processos do ensaio de resíduo insolúvel.	33
Figura 12. Amostras ensaiadas.	34
Figura 13. Mufla.	34
Figura 14. Série de peneiras utilizadas no ensaio.....	35
Figura 15. Misturador vertical.	37
Figura 16. Equipamentos de moldagem.....	38
Figura 17. Molde do corpo de prova.....	38
Figura 18. Corpos de prova na câmara úmida.	38
Figura 19. Corpos de prova desmoldados e identificados.....	38
Figura 20. Corpos de prova submersos para cura.	39
Figura 21. Retirada do material metálico.....	40
Figura 22. Amostra no imã.	40
Figura 23. Processo de retífica do corpo de prova.....	41
Figura 24. Corpo de prova antes (a) e depois (b) da retífica.....	41
Figura 25. Prensa de compressão axial.	41
Figura 26. Corpo de prova quebrado no processo de desmolde.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.	21
Tabela 2: Limites de composição do cimento Portland (% de massa).....	22
Tabela 3. Resultados em estado fresco e endurecido para incorporação de coproduto LD.....	24
Tabela 4: Resultados para incorporação de coproduto BSSF.	25
Tabela 5. Média dos resultados para lotes de coproduto KR.	28
Tabela 6. Resultados de f_{ck} para os 5 lotes incorporados no CP II E.	28
Tabela 7. Resultados de f_{ck} para os 5 lotes incorporados no CP III.	28
Tabela 8: Resultados para incorporação de coproduto KR.	29
Tabela 9: Resultados de Expansibilidade Le Chatelier para incorporação de coproduto KR.	29
Tabela 10. Caracterização do CP V ARI.....	35
Tabela 11. Dados de coleta dos Lotes de KR.....	36
Tabela 12. Quadro resumo das amostras.	39
Tabela 13. Resultados de FRX KR.....	42
Tabela 14. Resultados de FRX de KR obtidos por Bonifácio	43
Tabela 15. Massa específica do CP V, lotes de KR e da EGAF.....	43
Tabela 16. Superfície específica do CPV, lotes de KR e da EGAF.....	44
Tabela 17. Resíduo insolúvel do CP V, lotes de KR e da EGAF.....	44
Tabela 18. Perda ao fogo do CP V, lotes de KR e da EGAF	45
Tabela 19. Diferença percentual do f_{ck} do CP II E segundo a NBR 7215:2019.	49
Tabela 20. Diferença percentual do f_{ck} do CP III segundo a NBR 7215:2019.....	49
Tabela 21. Diferença percentual do f_{ck} do CP II E para cada idade.	49
Tabela 22. Diferença percentual do f_{ck} do CP III para cada idade.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva granulométrica da areia.....	36
Gráfico 2. Curvas granulométricas à Laser.	46
Gráfico 3. Resistência à compressão das amostras de CP II E.	47
Gráfico 4. Resistência à compressão das amostras de CP III.....	47
Gráfico 5. Potencial de f_{ck} para as amostras de CP II E	48
Gráfico 6. Potencial de f_{ck} para as amostras de CP III.	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Cálculo da superfície específica Blaine.....	31
Equação 2. Cálculo da % de resíduo insolúvel.	33
Equação 3. Cálculo da % de perda ao fogo.	34

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BSSF – Baosteel Slag Short Flow

C₂S – Silicato dicálcico

C₃A – Aluminato tricálcico

C₃S – Silicato tricálcilco

C₄AF – Ferro aluminato tetracálcico

CO₂ – Gás carbônico

CP – Cimento Portland

CP II E – Cimento Portland Composto com escória granulada de alto-forno

CP III – Cimento Portland de Alto-Forno

CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência

EGAF – Escória Granulada de Alto-Forno

f_{ck} – Resistência característica do concreto à compressão

FRX – Fluorescência de Raios-X

GCCA – Global Cement and Concrete Association

HCl – ácido clorídrico

KR – Kambara Reactor

LD – Linz-Donawitz

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

NaOH – Hidróxido de sódio

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

PF – Perda ao Fogo

RI – Resíduo Insolúvel

S – Finura Blaine

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

WBCSD – World Business Council for Sustainable Development

ρ - Massa específica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. CIMENTO PORTLAND.....	18
2.2. ADIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND	19
2.2.1. Pozolanas	20
2.2.2. Filer	20
2.2.3. Escória de Alto Forno	21
2.3. COPRODUTOS SIDERÚRGICOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA	22
2.3.1. Coproduto de aciaria LD	23
2.3.2. Coproduto de aciaria BSSF	24
2.3.3. Coproduto KR	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. MATERIAIS.....	30
3.1.1. Ensaios de caracterização	30
3.1.1.1. Massa específica	30
3.1.1.2. Finura Blaine.....	31
3.1.1.3. Resíduo insolúvel	32
3.1.1.4. Perda ao Fogo.....	34
3.1.1.5. Granulometria.....	35
3.1.2. Cimento Portland Tipo V ARI	35
3.1.3. Escória Granulada de Alto Forno.....	35
3.1.4. Pó de KR	36
3.1.5. Areia	36

3.2. MÉTODOS	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	42
4.1.1. Fluorescência de raios-X	42
4.1.2. Massa específica	43
4.1.3. Finura Blaine.....	44
4.1.4. Resíduo Insolúvel	44
4.1.5. Perda ao Fogo	45
4.1.6. Granulometria à laser	46
4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	46
5. CONCLUSÃO	52
6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	54
7. APÊNDICE	55
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

A indústria cimentícia tem grande importância no desenvolvimento da humanidade, tendo papel fundamental na infraestrutura da sociedade moderna, seja por meio das características do material, principal componente do concreto, mas também pela importância econômica que o material desempenha.

Apesar das diversas qualidades, o cimento é responsável por cerca de 7% das emissões globais de dióxido de carbono, CO₂ (WBCSD, 2018) e 22,7% da emissão nacional de CO₂ (Brasil, 2022). Por esses motivos, é de extrema importância buscar atividades que possam reduzir seu impacto ambiental causado pela produção do material.

A incorporação de adições minerais ao cimento Portland, como coprodutos siderúrgicos, desponta como uma estratégia promissora para mitigar essas emissões e promover a sustentabilidade do setor. Essa prática, que vem sendo adotada ao longo do tempo, já inclui o uso consolidado de materiais como pozolanas e escórias siderúrgicas no Brasil, conforme estabelecido pela NBR 16697 (2018).

Por já se encontrar difundida no mercado como produto, escória granulada de alto forno deixou de ser um resíduo, diminuindo sua disponibilidade. Por esse motivo, é desejável buscar outros materiais para atuar como adição mineral no cimento Portland, mantendo assim a redução do cimento resultando na redução da emissão de dióxido de carbono.

O coproducto KR, resultante do processo de dessulfuração do gusa líquido na produção de aço, proveniente do Reator Kambara, apresenta um potencial como adição, devido à sua composição química e disponibilidade, aliando à busca por outros materiais cimentícios suplementares, mantendo assim a redução de cimento com a reutilização de um material tomado como resíduo, destinando o material de forma adequada, reduzindo os impactos ambientais.

O estudo da incorporação do coproducto KR se torna atrativo por conta do material se encontrar no estado de pó após o processo de dessulfuração por agitação mecânica, sem a necessidade da moagem do material, trazendo viabilidade econômica.

É importante ressaltar que a variabilidade entre lotes de KR pode causar impacto no beneficiamento de suas propriedades.

O objetivo da pesquisa é estudar a variação entre os lotes do coproduto KR como adição mineral no cimento Portland. Para isso, foram realizados ensaios para verificar as propriedades no estado endurecido do cimento por meio da produção de cimentos compostos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de cimentos compostos incorporando o coproduto KR, buscando verificar sua viabilidade como adição mineral.

1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar a homogeneidade de diferentes lotes de coproduto KR em relação às suas características físicas e ao desempenho mecânico dos cimentos compostos produzidos com esses lotes.
- Analisar o efeito do beneficiamento do coproduto KR, utilizando apenas a fração fina passante na peneira de 0,075 mm, no desempenho mecânico dos cimentos compostos.

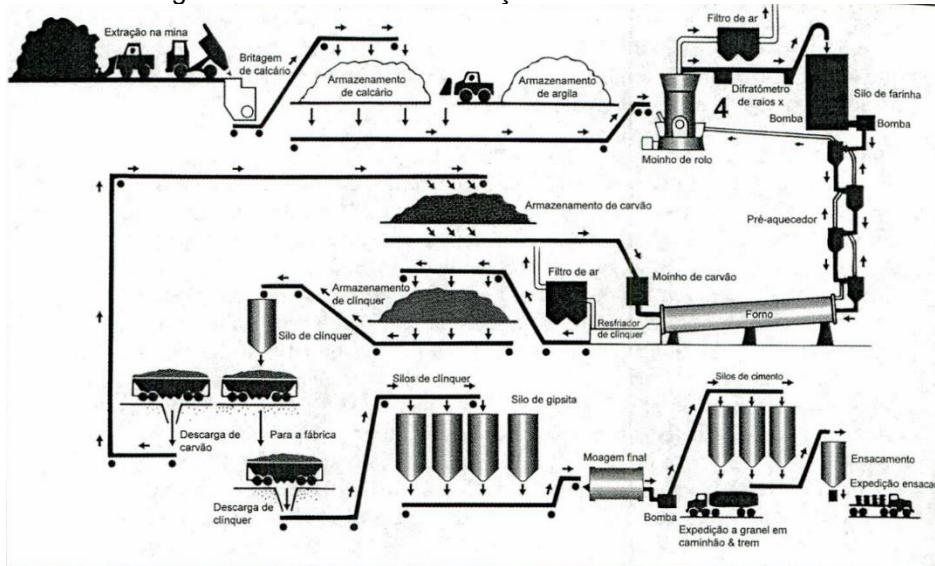
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CIMENTO PORTLAND

O uso de materiais cimentícios tem sido de grande importância para o desenvolvimento humano. Há indícios do uso desses materiais no Egito Antigo, Grécia, e, mais importante, no império romano. Com o fim do Império, perdeu-se a receita para o que hoje se conhece como cimento por centenas de anos, sendo redescoberta em 1824 por Joseph Aspdin, que patenteou sua descoberta como Cimento Portland (Hewlett, 2006).

A produção do Cimento Portland começa com a extração do calcário em jazidas. O calcário então é britado e dosado com argila e minério de ferro, formando a chamada mistura crua, que passa pelo processo de queima dentro do forno, utilizando, em sua maioria, combustíveis fósseis. Esse processo tem como produto o Clínquer, material base do cimento. Após ser resfriado, o clínquer é moído juntamente com adições como gesso, pozolona e filler calcário, formando assim o cimento Portland (ABCP, 2023). A Figura 1 mostra o processo de fabricação do cimento Portland.

Figura 1: Processo de fabricação do Cimento Portland.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Um fenômeno importante que ocorre é a hidratação do Cimento Portland. Ao reagir com a água, ocorre a formação de produtos com características de endurecimento, pega e resistência. Os componentes do Cimento Portland que se hidratam são os silicatos e os aluminatos de cálcio. A hidratação dos silicatos de cálcio, na forma de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) e $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S) são responsáveis pelo

desenvolvimento da resistência do produto hidratado; já a hidratação dos aluminatos de cálcio, na forma de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) e $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) são responsáveis por fornecer um alto calor de hidratação, acelerando, assim, a hidratação dos silicatos de cálcio (Mehta; Monteiro, 2008).

Toda a produção do cimento gera uma grande emissão de dióxido de carbono, por utilizar maquinários pesados e queima de combustíveis fósseis. Em 2020 no Brasil, a produção de cimento foi responsável pela emissão de 22,7% de todo o CO_2 emitido pelo setor industrial (Brasil, 2022). Se tratando de emissões globais, a indústria cimentícia se tornou responsável por 7% do CO_2 emitido pelas indústrias em 2018 (WBCSD, 2018).

Há alguns anos, a importância de a indústria cimenteira adotar medidas que reduzam as emissões de dióxido de carbono tem sido amplamente reconhecida, especialmente considerando que, até 2050, o consumo global de concreto — cuja principal matéria-prima é o cimento — pode alcançar 20 bilhões de metros cúbicos, em comparação aos 14 bilhões de metros cúbicos registrados atualmente (GCCA, 2023). Uma estratégia eficaz para mitigar esse impacto é a utilização de adições no cimento, reduzindo a quantidade de clínquer no produto final, abordagem que é o foco deste estudo.

2.2. ADIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND

As adições são materiais adicionados ao cimento, visando melhorar as propriedades do aglomerante tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A quantidade de adição pode variar dependendo do tipo e da norma técnica aplicável, como pode ser visto na Tabela 2, podendo em alguns casos ultrapassar 50% da massa total do cimento (Bauer, 2019). As adições se classificam como ativas e inertes. As adições ativas, ao se incorporar à matriz cimentícia, participam ativamente da reação de hidratação, modificando as propriedades finais do material, podendo agir de diversas maneiras, como reagindo com subprodutos da reação de hidratação, produzindo novos produtos. Por outro lado, as adições inertes, embora não participem da reação de hidratação, desempenham um papel significativo ao ajustar propriedades físicas e mecânicas do cimento, atuando de forma a incorporar partículas finas ao cimento, criando pontos de nucleação e podendo melhorar a

trabalhabilidade do concreto. As principais adições ao Cimento Portland são as pozolanas, filer e escória de alto forno (Mehta; Monteiro, 2008).

2.2.1. Pozolanas

As pozolanas são materiais silicosos ou aluminosos que, quando finamente moídas e incorporadas ao cimento, reagem com os produtos da hidratação, como hidróxido de cálcio, formando compostos adicionais que contribuem para o aumento da resistência do concreto (Mehta; Monteiro, 2008). Alguns exemplos de pozolanas são a sílica ativa, cinza volante e metacaulim.

A sílica ativa, coproducto obtido da produção de silício a partir de quartos de alto grau de pureza, promove uma reação altamente eficiente, acelerando a reação com o hidróxido de cálcio por conta da sua finura, favorecendo a resistência e durabilidade da pasta (Goto; et al, 2018).

A cinza volante, originada a partir dos gases de combustão de usinas termoelétricas à carvão mineral, por ter finura elevada e formato esférico, conferem à pasta uma maior resistência e um menor consumo de água (Neville, 2016).

O metacaulim, resultado da calcinação da argila caulinítica, melhora a coesão e diminui o efeito de exsudação, por conta da finura obtida após a moagem do material, juntamente com sua composição química, sendo formado por SiO_2 e Al_2O_3 (Siddique, 2008).

2.2.2. Filer

O filer, geralmente constituído por materiais finamente moídos de rochas calcárias, atua preenchendo os espaços vazios entre as partículas de cimento, proporcionando uma matriz mais compacta. Essa ação contribui para a melhoria da trabalhabilidade do concreto e reduz a quantidade de água necessária para a mistura, resultando em uma pasta mais coesa (Silva; et al, 2022). Além disso, a presença do filer pode promover um efeito de nucleação, acelerando o processo de hidratação do cimento e, consequentemente, aumentando a resistência inicial do concreto (Mehta; Monteiro, 2008). As vantagens do filer incluem a otimização do consumo de cimento, redução da fissuração, melhoria na resistência mecânica e a possibilidade de produção de concretos mais sustentáveis, ao aproveitar subprodutos industriais como fonte de filer.

2.2.3. Escória de Alto Forno

A utilização de escória de alto forno como adição ao cimento Portland é uma prática que visa melhorar significativamente as propriedades do concreto. A escória de alto forno, resultado da produção do ferro gusa, processo esse que gera cerca de 300kg de escória por tonelada de ferro gusa produzido (Goto; et al, 2018), é um produto que se gerado a partir do resfriamento de forma rápida da escória líquida em alta temperatura, mantém propriedades cimentantes satisfatórias, pois a maior parte do calcário, magnésio, sílica e alumina permanece em um estado não-cristalino, sendo necessário, porém, moer a escória até a finura de 400 até 500m²/kg (Mehta; Monteiro, 2008).

No Brasil, existem diversos tipos de cimentos normalizados. A NBR 16697:2018 apresenta suas classificações, conforme Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I		
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	-	-

a O sufixo RS significa resistente a sulfatos.

b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação.

c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215:2019.

d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215:2019 e atende aos demais requisitos estabelecidos na ABNT NBR16697:2018.

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018)

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

Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
CP I	95 - 100		0 - 5	
CP I-S	90 - 94	0	0	6 - 10
CP II-E	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
CP II-F	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
CP II-Z	75 - 89	0	0	11 - 25
CP III	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
CP IV	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
CP V ^a	90 - 100	0	0	0 - 10
CPB	75 - 100	-	-	0 - 25
CPB	50 - 74	-	-	26 - 50

a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (2018)

2.3. COPRODUTOS SIDERÚRGICOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A incorporação de coprodutos siderúrgicos como adição ao cimento Portland destaca-se pela relevância ambiental, especialmente devido à considerável quantidade de resíduos gerados na indústria siderúrgica. De acordo com ArcelorMittal (2023), para cada tonelada de aço produzido, é gerado cerca de 600kg de resíduos, onde em sua grande parte, podem ser utilizados em outras finalidades, como melhoramento de solos, revestimento de pavimentações e, como no objeto desse estudo, para adições no cimento Portland.

Ao serem integrados no processo de fabricação do cimento Portland, não apenas se reduz a demanda por clínquer, mas também se minimiza o impacto ambiental associado ao descarte desses resíduos. Assim, a utilização estratégica de escórias siderúrgicas não apenas fortalece as propriedades do cimento, mas também contribui significativamente para a gestão sustentável de resíduos industriais, promovendo um ciclo mais eficiente e responsável na indústria da construção civil (JUENGER; et al., 2011).

Um dos coprodutos utilizados como adição mineral é a escória granulada de alto forno, que com o tempo deixou de ser um resíduo para se tornar um produto de siderurgia com utilização com diversas finalidades, sendo elas na própria incorporação no cimento Portland, quando em melhoramento e estabilização de solos e lastro ferroviário (ArcelorMittal, 2024). Pela consolidação desse produto no mercado, a

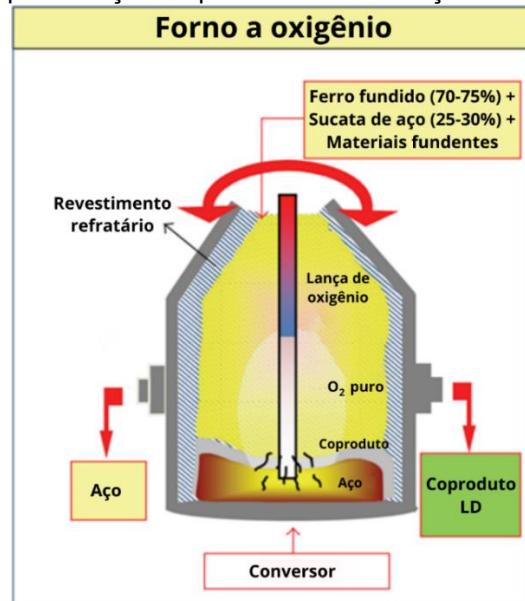
disponibilidade da EGAF vem se tornando cada vez menor, se fazendo necessário a busca por outros materiais que possam ser utilizados como adição mineral no cimento Portland.

Nesse capítulo, serão mostrados estudos que utilizaram a incorporação de coprodutos siderúrgicos no cimento Portland, juntamente com os resultados obtidos nas incorporações.

2.3.1. Coproduto de aciaria LD

A produção do coproduto de aciaria LD ocorre durante a fabricação do aço utilizando o método Linz-Donawitz. Nesse processo, o ferro-gusa é convertido em aço em um convertedor LD, onde oxigênio puro é inserido no aço fundido. O oxigênio remove impurezas como carbono, silício e manganês, resultando em aço de alta qualidade. É possível observar na Figura 2 o processo de fabricação do coproduto. O coproduto é formado durante essa operação, consistindo principalmente em óxidos de cálcio, silício, alumínio e magnésio. Devido à sua composição química, quando finamente moída, apresenta propriedades pozolânicas o que a torna adequada para ser utilizada como adição no cimento Portland (Yildirim; Prezzi, 2011).

Figura 2: Representação do processo de fabricação do coproduto LD.



Fonte: Adaptado de Yildirim e Prezzi (2011)

Na Tabela 3 estão mostrados os resultados realizados por Loureiro (2023) para os ensaios de espalhamento (\varnothing_{esp}), resistência à compressão (f_{ck}) e retração para misturas produzidas em laboratório. Foram realizados 2 teores de adição do coproduto, sendo 5% e 10% em substituição do cimento, para duas relações

água/aglomerante, 0,30 e 0,40. As amostras se caracterizam então como as referências (REF30 e REF40) e as contendo 5% (LD30-5 e LD40-5) e 10% (LD30-10 e LD40-10) em adição. A autora concluiu que a presença do coproduto aumentou a resistência à compressão em até 6% com 28 dias e 2% com 91 dias, teor de 10% e $a/c=0,30$.

Tabela 3. Resultados em estado fresco e endurecido para incorporação de coproduto LD.

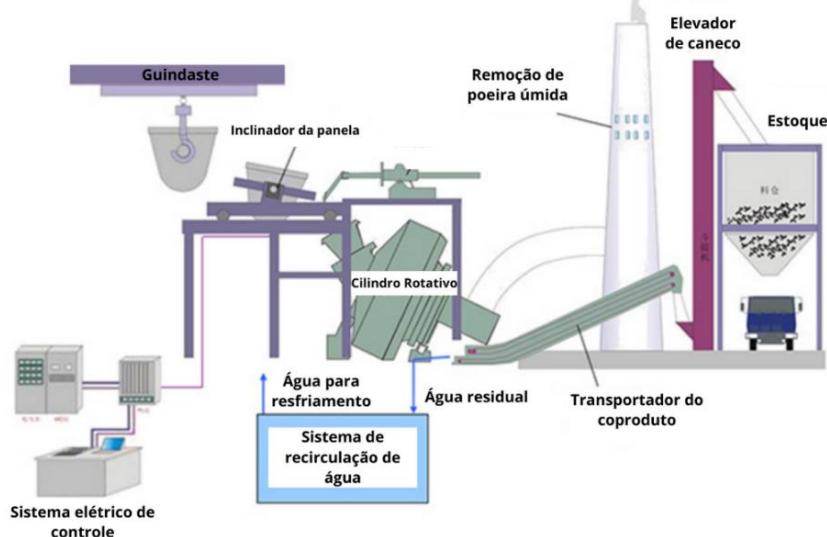
Amostra	\varnothing_{esp} (mm)	f_{ck} (Mpa)			Retração
		7 dias	28 dias	91 dias	
REF30	266	76,8	87,4	89,8	-
LD30-5	263	65,6	82,6	88,2	4%
LD30-10	259	73,2	86,6	91,5	8%
REF40	258	58,7	62,3	68,4	-
LD40-5	241	51,8	63,0	71,8	-12%
LD40-10	237	56,9	66,0	68,5	-3%

Fonte: Adaptado de Loureiro (2023).

2.3.2. Coproduto de aciaria BSSF

No final dos anos 90 a empresa Baosteel desenvolveu um novo processo para o tratamento dos coprodutos de aciaria; o método foi batizado de BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*). O processo, que pode ser observado na Figura 3, ocorre dentro de um cilindro rotativo e consiste em realizar o resfriamento do material líquido de forma brusca, tornando o coproduto sólido e, ao mesmo tempo, realizando a moagem para uma granulometria específica. O processo tem como grande vantagem o curto tempo para a produção do coproduto, podendo levar de 3 a 5 minutos (Baosteel, 2023).

Figura 3: Representação do processo de fabricação do coproduto BSSF.



Fonte: Adaptado de Baosteel, 2023.

Na Tabela 4 estão mostrados os resultados realizados por Dias *et al.*, (2020) para os ensaios de massa específica (μ), resistência à compressão (f_{ck}), absorção de água (A) e coesão (slump test) para concretos produzidos com CP V ARI e coproduto nos teores de 0, de 3%, 6% e 12% em substituição do cimento. Os autores concluíram que a presença do coproduto aumentou a resistência à compressão em até 27% com 63 dias e teor de 12%.

Tabela 4: Resultados para incorporação de coproduto BSSF.

Amostra	μ (g/cm ³)	f_{ck} (Mpa)			A (%)	Slump Test (mm)
		7 dias	28 dias	63 dias		
TREF	2,17	24,5	30,4	32,7	6,5	100
TS3	2,21	27,4	33,1	33,8	6,4	105
TS6	2,22	28,1	33,0	35,3	6,0	95
TS12	2,26	31,3	35,9	41,4	5,2	95

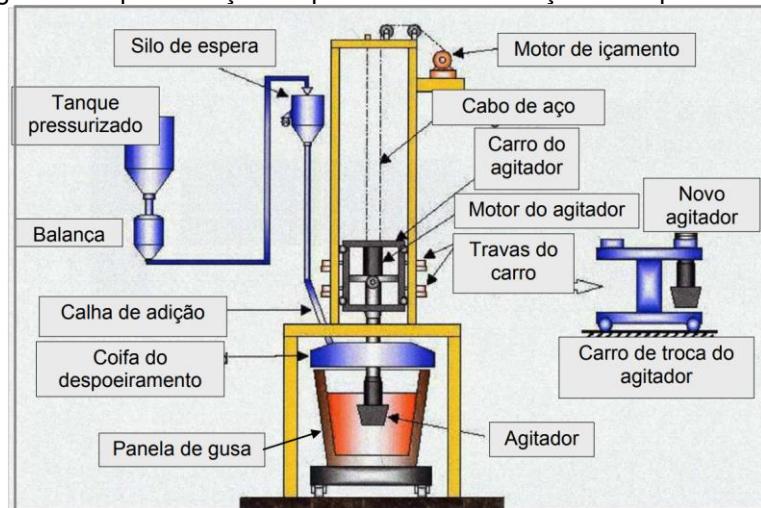
Fonte: Adaptado de Dias, *et al.*, 2020

2.3.3. Coproduto KR

Visando a melhoria na qualidade do aço, as indústrias siderúrgicas trabalham em meios para retirar o enxofre presente no gusa líquido. Um dos métodos desenvolvidos nos anos 60, que se tornou mais eficiente no final dos anos 90 é o de dessulfuração por agitação, também conhecido como processo KR (*Kambara Reactor*) (Oliveira, 2015).

O processo KR, que pode ser visto tanto na Figura 4 quanto na Figura 5, consiste na agitação mecânica do gusa líquido por meio de uma pá refratária (*impeller*), provocando o contato do líquido com o material dessulfurante, que possui baixa granulometria, permitindo que os mecanismos que impeçam a reação sejam suprimidos (Kirmse, 2006). Os principais motivos para o qual o processo KR ser tão eficiente, é a geometria da panela, que não permite a existência de zonas mortas, que podem causar áreas com diferentes concentrações de enxofre, tornando o líquido homogêneo (Oliveira, 2015); e que após 10 ou 15 minutos do processo, a taxa de dessulfuração do material pode chegar até 90%, como pode ser observado na Figura 6 (Barão, 2008).

Figura 4: Representação do processo de fabricação do coproduto KR.



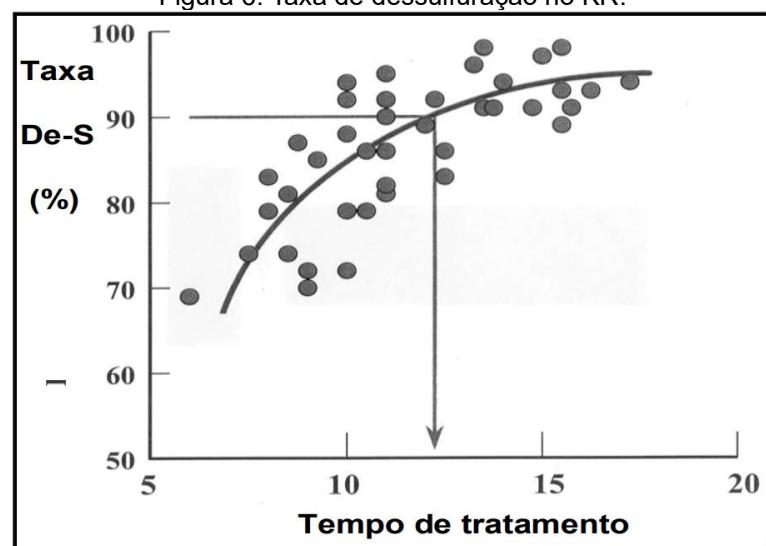
Fonte: Kirmse, 2006

Figura 5: Visão externa do KR.



Fonte: NipponSteel, 2023

Figura 6: Taxa de dessulfuração no KR.



Fonte: Barão, 2008

Na Figura 7 é possível visualizar a comparação do processo KR com o processo tradicional, identificando as vantagens do método, como baixo custo e maior capacidade de dessulfuração (De-S).

Figura 7: Comparação entre os processos KR e Tradicional.

	Processo KR	Processo de injeção
Representação do processo		
Método de adição do agente De-S	Adicionado no estágio inicial	Injeção de pó pela lança
Mecanismo de reação De-S	Escória de topo misturada por Impeller	Injeção de pó durante flutuação
Tolerância de seleção de agente De-S	Pó até sólidos	Apenas pó
Queda de temp. do metal quente	Baixa	Alta
Alta capacidade de De-S	Muito boa (Concentração de S: Aprox. 10ppm)	Muito boa (Concentração de S: Aprox. 10ppm)
Capacidade de processamento em alta velocidade	Muito boa (Tempo de processo: Aprox. 10min)	Razoável (Tempo de processo: Aprox. 10min)
Agente De-S	CaO (preço unitário: Aprox. 0,13USD/kg)	Mg+CaC ₂ (preço unitário: Aprox. 0,13USD/kg)
Índice de custo de operação de De-S (para o mercado indiano)	55	100

Fonte: Adaptado de NipponSteel, 2023

As reações de dessulfuração formam sulfetos sólidos estáveis que são então removidos por meio de raspagem do material formado na superfície, que é transportado para o poço de resfriamento, que terá sua temperatura reduzida por meio de pulverização de água. O processo, mesmo que forme grãos menores, ainda necessita de britagem ou moagem do material, permitindo a liberação de sucatas de metal que são recuperadas e reutilizadas no processo de fabricação do aço (Dieguez, 2018). O produto final é o coproduto KR, que será o material utilizado neste estudo.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos por Bonifácio (2024) para os ensaios de massa específica, finura, perda ao fogo e resíduo insolúvel para 5 lotes do coproduto KR utilizado pela autora, assim como o resultado do ensaio de resistência à compressão axial para as amostras produzidas com cada lote do coproduto KR, tanto para a composição em CP II E, na Tabela 6, quanto para CP III, representado na Tabela 7.

A autora concluiu que o material não se comporta de forma uniforme, sofrendo variações conforme a data de coleta, mas apesar disso, que o material é uma alternativa promissora para a produção de cimentos compostos.

Tabela 5. Média dos resultados para lotes de coproduto KR.

Amostra	ρ (g/cm ³)	S (cm ² /g)	PF (%)	RI (%)
Lote 1	2,87	2970	12,73	5,80
Lote 2	2,92	2590	10,64	5,48
Lote 3	2,86	3050	10,03	7,84
Lote 4	2,98	2680	6,65	13,01
Lote 5	2,91	2410	6,45	8,54

Fonte: Adaptado de Bonifácio, 2024

Tabela 6. Resultados de fck para os 5 lotes incorporados no CP II E.

Amostra	f _{ck} (Mpa)			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF CP V	26,5	34,5	41,5	43,6
REF CP II E	17,7	28,6	42,3	47,1
Lote 1	18,2	27,3	33,9	43,1
Lote 2	19,8	26,5	37,1	44,5
Lote 3	17,0	26,6	41,2	47,9
Lote 4	18,9	27,9	38,4	43,8
Lote 5	17,3	25,2	35,9	44,9

Fonte: Adaptado de Bonifácio, 2024

Tabela 7. Resultados de fck para os 5 lotes incorporados no CP III.

Amostra	f _{ck} (Mpa)			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
REF CP V	26,5	34,5	41,5	43,6
REF CP III	13,2	24,7	40,0	43,9
Lote 1	8,3	18,3	26,6	31,2
Lote 2	11,2	21,6	36,0	37,3
Lote 3	10,2	19,9	28,5	35,9
Lote 4	10,2	20,1	32,7	36,9
Lote 5	10,4	18,5	26,3	36,4

Fonte: Adaptado de Bonifácio, 2024

Estão representados na Tabela 8 e Tabela 9 os resultados realizados por Dieguez, (2018) para os ensaios de finura, representados pela porcentagem de massa retira na peneira de 75 μ m, resistência à compressão (f_{ck}), tempo de pega e expansibilidade Le Chatelier para um CP III 30 com incorporação de coproduto. Foram realizados 3 teores de adição do coproduto, sendo 5% (M1), 15% (M2) e 30% (M3) em substituição do cimento. Para o ensaio de expansibilidade Le Chatelier foram produzidos 4 amostras

(A, B, C e D) para cada concentração; as medidas foram realizadas nos tempos de 0 horas (d_0), 3 horas (d_3) e 5 horas (d_5). A autora concluiu que com a adição do coproduto, não foi possível manter a classificação para classe de resistência do CP III 40, visto que nenhuma das amostras obteve valores mínimos estipulados pela NBR 16697 (ABNT, 2018) para tal classe. Já para a expansibilidade, a amostra atende os requisitos da norma, uma vez que os resultados obtidos ficaram abaixo do limite de 5,0 mm.

Tabela 8: Resultados para incorporação de coproduto KR.

Amostra	Massa Retida 75µm (%)	f _{ck} (Mpa)					Tempo de pega	
		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	Início (min)	Fim (min)
M1	1,46	4,8	13,5	20,7	28,8	33,1	263	371
M2	3,30	3,7	11,4	20,0	25,4	29,8	253	315
M3	7,26	28,0	9,7	15,6	20,5	23,3	180	302

Fonte: Adaptado de Dieguez, 2018

Tabela 9: Resultados de Expansibilidade Le Chatelier para incorporação de coproduto KR.

Amostra	A			B			C			D		
	d_0 (mm)	d_3 (mm)	d_5 (mm)									
M1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M2	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
M3	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5

Fonte: Adaptado de Dieguez, 2018

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo baseia-se na pesquisa iniciada por Bonifácio (2024), que estabeleceu uma análise inicial sobre a utilização de materiais alternativos na construção civil. Como um complemento à pesquisa original, o presente trabalho teve como objetivo incorporar lotes adicionais de escória KR na análise, a fim de verificar a homogeneidade do material e a robustez dos dados obtidos anteriormente. As metodologias adotadas foram elaboradas para garantir a compatibilidade e a continuidade dos estudos anteriores, mantendo uma abordagem coerente com os objetivos propostos, ao mesmo tempo em que se buscou aprofundar a compreensão sobre a consistência dos lotes analisados.

3.1. MATERIAIS

Neste item estão descritos os materiais utilizados na pesquisa: cimento CPV ARI, EGAF, coproduto KR e agregado miúdo natural. Para a caracterização dos aglomerantes foram realizados os ensaios de massa específica (ρ), finura Blaine (S), perda ao fogo (PF), resíduo insolúvel (RI), granulometria à laser e, para o caso do coproduto KR, Fluorescência de Raio X (FRX). Para o agregado foram realizados os ensaios de massa específica, pulverulento e granulometria.

3.1.1. Ensaios de caracterização

3.1.1.1. Massa específica

O ensaio de massa específica, descrito NBR 16605:2017, consiste na razão entre a massa da amostra pelo volume de líquido deslocado no recipiente.

Para o ensaio, é utilizado o frasco Le Chatelier (Figura 8). Registra-se a leitura inicial do frasco contendo líquido não reagente com a amostra, nesse caso, querosene. A amostra, que deve ter massa de $1\pm0,01$ g, é adicionada completamente com auxílio de um funil. Ao final, tomando cuidado para retirar todas as bolhas presentes no frasco, registra-se a leitura do volume. É obtido então o valor da massa específica.

Figura 8. Frasco Le Chatelier.



Fonte: O autor (2024)

3.1.1.2. Finura Blaine

Para o ensaio de permeabilidade por ar, ou finura Blaine, foram seguidos os procedimentos da NBR 16372:2012.

O ensaio consiste na medição do tempo em que leva para que o líquido presente na aparelhagem (Figura 9) leva para passar entre as marcas inicial e final de referência.

A amostra é inserida no em um tubo (Figura 10) para ser compactada em um volume específico, estipulando a massa com que o pistão sofra uma resistência específica ao ser compactada. Com a amostra pronta, basta inserir no aparelho e retirar o pistão.

A superfície específica é então calculada pela Equação 1.

Equação 1. Cálculo da superfície específica Blaine.

$$S = K \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{0,1\eta}}$$

Fonte: NBR 16372 (2015)

onde,

S : Superfície específica Blaine (cm^2/g)

K : Constante do aparelho, determinada por calibração

ε : Porosidade da camada

t : Tempo médio de permeabilidade (s)

ρ : Massa específica do ar nas condições do ensaio (g/cm³)

η : Viscosidade do ar à temperatura ambiente (Pa^{1/2}.cm⁻¹)

Figura 9. Aparelho para ensaio de finura Blaine.



Fonte: O autor (2024)

Figura 10. Pistão para compactação da amostra.



Fonte: O autor (2024)

3.1.1.3. Resíduo insolúvel

O ensaio de resíduo insolúvel é prescrito pela NBR 17086-4:2023 e consiste em atacar a amostra tanto com reagente ácido quanto básico para que no fim, reste apenas a parte do material que é considerada insolúvel.

Para o ensaio, utiliza-se $1 \pm 0,001$ g de material, dissolvido em 25ml de água em temperatura ambiente buscando formar uma solução homogênea. Em seguida, realizar o ataque ácido, acrescentando 5ml de ácido clorídrico (HCl), e diluir a amostra em 50ml de água próximo à ebulação e filtrando o conteúdo em papel de filtração média e lavar por no mínimo 10 vezes a amostra com água quente.

Em seguida é realizado o ataque básico, adicionando aproximadamente 100 ml de hidróxido de sódio (NaOH), reservando a amostra por cerca de 15 minutos. Após o processo, é realizado outro ataque ácido buscando neutralizar a solução. O processo é controlado com a adição de 3 a 4 gotas de vermelho de metila, identificador do pH da solução. Adiciona-se HCl até que a solução perca a cor avermelhada.

Por fim, é realizado a última lavagem da amostra e retirado o papel filtro com o restante do material que será levado para mufla para ser aquecido à $950\pm50^{\circ}\text{C}$, permitindo a queima total do papel de filtro, restando apenas o material insolúvel.

As etapas do procedimento podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11. Processos do ensaio de resíduo insolúvel.



Fonte: O autor (2024)

Os resultados podem ser obtidos pela Equação 2.

Equação 2. Cálculo da % de resíduo insolúvel.

$$\%RI = ((m2 - m1) / m) * 100$$

Fonte: NBR 17086-4 (2023)

onde,

$\%RI$: Porcentagem de resíduo insolúvel

m: Massa da amostra, expressa em gramas (g)

*m*1: Massa do cadiño, expressa em gramas (g)

*m*2: Tara do cadiño mais a massa do resíduo insolúvel, em gramas (g)

3.1.1.4. Perda ao Fogo

O ensaio de perda ao fogo é realizado seguindo os procedimentos da NBR 17086-6:2023, onde é utilizado uma amostra de $1\pm0,001$ g de material (Figura 12) que deve ser levada para a mufla (Figura 13) à temperatura de $950\pm50^{\circ}\text{C}$ por um período de no mínimo 60 min. São registrados os valores de massa do material antes e depois do processo de queima. Com isso, é possível obter a porcentagem da perda ao fogo pela Equação 3.

Equação 3. Cálculo da % de perda ao fogo.

$$\%PF = ((m1 - m2) / m) * 100$$

onde,

m: massa da amostra utilizada no ensaio, expressa em gramas (g);

*m*1: massa do cadiño mais a massa de amostra ensaiada, expressa em gramas (g);

*m*2: massa do cadiño mais a amostra, após a queima, em gramas (g).

Figura 12. Amostras ensaiadas.



Fonte: O autor (2024)

Figura 13. Mufla.



Fonte: O autor (2024)

3.1.1.5. Granulometria

O ensaio de granulometria para a areia é realizado seguindo a norma NM 248. O ensaio consiste em determinar a distribuição dos tamanhos das partículas que compõem a amostra. Para isso, uma quantidade de areia previamente seca é passada por uma série de peneiras com aberturas padronizadas, em ordem decrescente de tamanho (Figura 14). O material retido em cada peneira é pesado, e os resultados são expressos em porcentagem em relação à massa total da amostra. Com esses dados, é possível construir a curva granulométrica (Gráfico 1), que fornece um perfil visual da distribuição dos tamanhos das partículas na areia, auxiliando na avaliação de suas características e adequação para diferentes aplicações.

Figura 14. Série de peneiras utilizadas no ensaio.



Fonte: O autor (2024)

3.1.2. Cimento Portland Tipo V ARI

Neste trabalho foi utilizado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) fornecido pela empresa Mizu Cimentos. O cimento foi escolhido por ter baixo teor de adições e permitir a preparação dos cimentos compostos que serão apresentados no capítulo 3.2.

Os resultados da caracterização do material estão identificados na Tabela 10, com exceção ao ensaio de granulometria à laser, que está apresentado no capítulo 4.1.6.

Tabela 10. Caracterização do CP V ARI.

ρ (g/cm ³)	3,03
S (cm ² /g)	3.844
PF (%)	4,33
RI (%)	1,23

Fonte: O autor (2024)

3.1.3. Escória Granulada de Alto Forno

Neste trabalho foi utilizado a escória granulada de alto forno (EGAF) de siderurgia para a preparação dos cimentos compostos que estão apresentados no capítulo 3.2.

Os resultados da caracterização do material estão apresentados no item 4.

3.1.4. Pó de KR

O coproduto KR que foi utilizado nessa pesquisa foi disponibilizado pela empresa ArcelorMittal, que forneceu para a pesquisa 2 lotes do material, sendo eles KR1 e KR2. As informações de coleta das amostras podem ser observadas na Tabela 11.

Por ser o objeto desse estudo, os resultados da caracterização dos materiais estão apresentados no item 4

Tabela 11. Dados de coleta dos Lotes de KR.

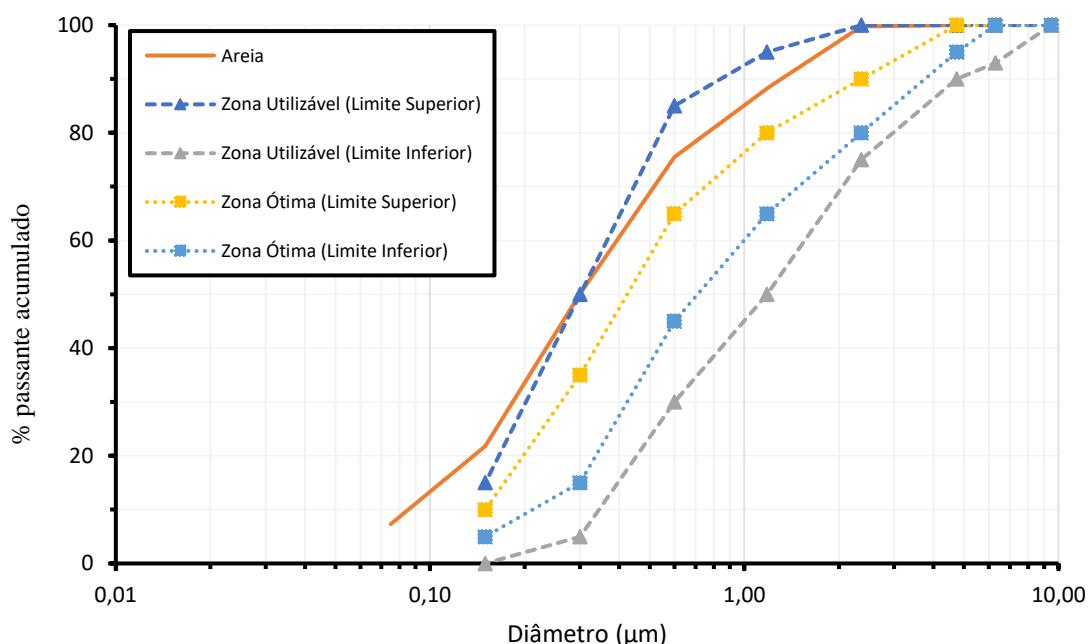
Coleta	KR1	KR2
Local	PAS	PAS/UBS
Data	27/02/24	30/11/23
Hora	14:30	15:30
Coletor	Pá	Concha
Quantidade	5kg	15kg

Fonte: O autor (2024)

3.1.5. Areia

Como agregado para a preparação das amostras foi utilizada areia natural de cava de Linhares, vinda da empresa Concrevit. Seguindo os procedimentos em norma, foi possível obter a massa específica da areia em $2,62 \text{ g/cm}^3$, presença de material pulverulento em 5,73%, além de compor a curva granulométrica no Gráfico 1

Gráfico 1. Curva granulométrica da areia.



Fonte: O autor (2024)

3.2. MÉTODOS

Para a produção das amostras foi utilizado o CP V ARI para composição tanto do CP II-E quanto do CP III. Ambos os cimentos foram compostos com adição dos coprodutos KR. A amostra de referência do CP II E foi produzida na proporção de 65% de CP V ARI e 35% de EGAF, enquanto a amostra referência de CP III foi utilizada uma proporção de 25% de CP V ARI e 75% de EGAF.

Para a composição dos cimentos, foi realizada a substituição de 15% da massa do aglomerante pelo coproduto KR. O material substituído foi a EGAF. Para a composição das argamassas foi realizado o procedimento previsto na NBR 7215:2019, com traço de 1:3:0,48 (cimento : areia : água) e produção de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura.

A produção dos corpos de prova seguiu as etapas de mistura, adensamento, desforma e cura. Para esse estudo, foi realizada a mistura com misturador vertical, que pode ser visto na Figura 15. Após a mistura, foi realizada a moldagem dos corpos de prova. A amostra é adensada em 4 camadas de alturas iguais, onde cada camada recebe 30 golpes. Os equipamentos para a moldagem podem ser vistos na Figura 16 e o molde na Figura 17. Após o molde, os corpos de prova foram levados para a câmara úmida por 24 horas (Figura 18) onde foi realizado o desmolde e identificação dos corpos de prova (Figura 19), que retornaram para a câmara úmida onde ficaram em cura submersa para serem rompidos nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias (Figura 20).

Figura 15. Misturador vertical.



Fonte: O autor (2024)

Figura 16. Equipamentos de moldagem.



Fonte: O autor (2024)

Figura 17. Molde do corpo de prova.



Fonte: O autor (2024)

Figura 18. Corpos de prova na câmara úmida.



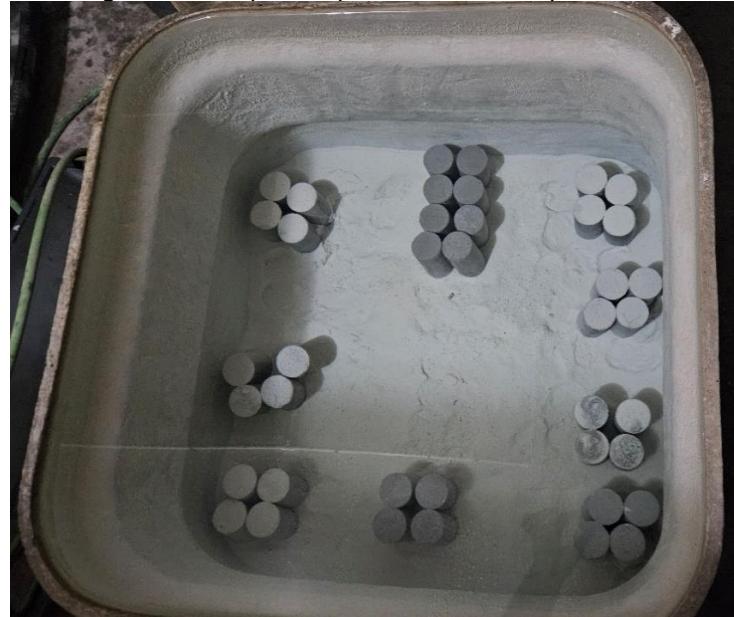
Fonte: O autor (2024)

Figura 19. Corpos de prova desmoldados e identificados.



Fonte: O autor (2024)

Figura 20. Corpos de prova submersos para cura.



Fonte: O autor (2024)

Para avaliação do uso do coproduto, foram utilizadas tanto a amostra *in natura* quanto o passante das amostras na peneira de número 200, com abertura de 75 μ m. Com isso, foram obtidas as amostras identificadas na Tabela 12.

Tabela 12. Quadro resumo das amostras.

Amostras	Descrição	Composição
REF CP V	Referência do CP V	100% CP V
REF CP II E	Referência do CP II E	65% CP V + 35% EGAF
CP II E KR1	CP II E com Lote 1 do KR	65% CP V + 20% EGAF +15% KR
CP II E KR2	CP II E com Lote 2 do KR	65% CP V + 20% EGAF +15% KR
CP II E KR1	CP II E com passante na 200 #200 do Lote 1 do KR	65% CP V + 20% EGAF +15% KR
CP II E KR2	CP II E com passante na 200 #200 do Lote 2 do KR	65% CP V + 20% EGAF +15% KR
REF CP III	Referência do CP III	25% CP V + 75% EGAF
CP III KR1	CP III com Lote 1 do KR	25% CP V + 60% EGAF +15% KR
CP III KR2	CP III com Lote 2 do KR	25% CP V + 60% EGAF +15% KR
CP III KR1	CP III com passante na 200 #200 do Lote 1 do KR	25% CP V + 60% EGAF +15% KR
CP III KR2	CP III com passante na 200 #200 do Lote 2 do KR	25% CP V + 60% EGAF +15% KR

Fonte: O autor (2024)

A pesquisa tinha também como objetivo avaliar o coproduto com a remoção de partículas metálicas, porém, ao utilizar um imã para retirada das partículas, toda a amostra foi atraída pelo imã, não restando material utilizável, como é possível ver na Figura 21 e na Figura 22

Figura 21. Retirada do material metálico.



Fonte: O autor (2024)

Figura 22. Amostra no imã.



Fonte: O autor (2024)

Durante a realização da pesquisa, foi identificado que a quantidade de material fornecida não seria suficiente para produção de corpos de prova para todas as idades de rompimento previstas na ABNT NBR 16697 (2018). Por esse motivo, foi decidido que as amostras que utilizam o coproduto KR passante na peneira 200 não serão produzidos corpos de prova para a idade de 3 dias.

O ensaio de resistência à compressão é realizado inicialmente com a retífica do corpo de prova (Figura 23) para que a superfície de contato com a prensa seja a mais

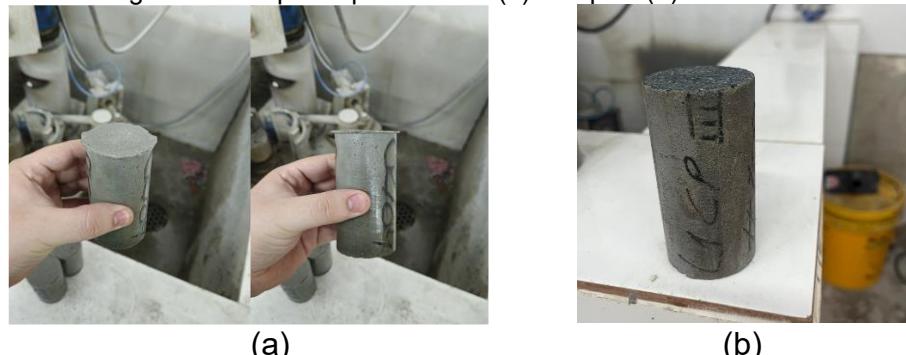
plana possível, buscando maior precisão dos resultados. Na Figura 24 é mostrado a diferença do corpo de prova antes e depois da retífica.

Figura 23. Processo de retífica do corpo de prova.



Fonte: O autor (2024)

Figura 24. Corpo de prova antes (a) e depois (b) da retífica.



Fonte: O autor (2024)

Após a retífica, os corpos de prova foram levados para a prensa de compressão axial (Figura 25) para o rompimento e obtenção do resultado de resistência à compressão.

Figura 25. Prensa de compressão axial.



Fonte: O autor (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados da caracterização dos materiais em estudo assim como os resultados obtidos para o estado endurecido das amostras produzidas.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Fluorescência de raios-X

Para o estudo em questão foi realizado o ensaio de FRX para análise da composição química dos lotes de KR. Os resultados estão representados na Tabela 13, assim como a Tabela 14 com os resultados obtidos por Bonifácio (2024), para efeito de comparação.

Tabela 13. Resultados de FRX KR.

	KR1	KR2	Desvio
Na (%)	0,16	0,20	0,03
Mg (%)	0,35	0,43	0,06
Al (%)	1,13	1,11	0,01
Si (%)	3,93	4,33	0,28
P (%)	0,04	0,07	0,02
S (%)	5,32	4,73	0,42
Cl (%)	0,15	0,32	0,12
K (%)	0,11	0,18	0,05
Ca (%)	37,2	33,5	2,62
Ti (%)	0,15	0,13	0,01
V (%)	nd	<0,01	-
Cr (%)	0,04	0,04	0,00
Mn (%)	0,14	0,19	0,04
Fe (%)	6,12	12,3	4,37
Ni (%)	<0,01	<0,01	-
Cu (%)	<0,01	<0,01	-
Zn (%)	0,02	0,07	0,04
Br (%)	nd	<0,01	-
Sr (%)	0,21	0,16	0,04
Ba (%)	nd	nd	-
Pb (%)	nd	<0,01	-

0,01% limite de quantificação FRX

nd: não detectado

Fonte: O autor (2024)

Tabela 14. Resultados de FRX de KR obtidos por Bonifácio

	LOTE 1	LOTE 2	LOTE 3	LOTE 4	LOTE 5	Desvio Padrão
Na (%)	0,13	0,19	0,14	0,17	0,16	0,02
Mg (%)	0,46	0,6	0,45	0,45	0,4	0,08
Al (%)	1,07	1,73	1,04	1,16	1,18	0,28
Si (%)	3,79	4,02	3,56	4,42	4,84	0,51
P (%)	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,01
S (%)	4,62	4,72	4,59	4,69	4,58	0,06
Cl (%)	0,19	0,29	0,29	0,29	0,2	0,05
K (%)	0,1	0,1	0,15	0,17	0,11	0,03
Ca (%)	34,7	35,2	35,5	34,6	37,3	1,09
Ti (%)	0,18	0,17	0,15	0,13	0,15	0,02
V (%)	nd	nd	nd	nd	nd	-
Cr (%)	0,02	0,06	0,04	0,03	0,05	0,02
Mn (%)	0,22	0,18	0,17	0,16	0,14	0,03
Fe (%)	8,43	7,84	8,23	11,6	8,56	1,52
Ni (%)	nd	nd	nd	nd	nd	-
Cu (%)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-
Zn (%)	0,04	0,04	0,06	0,08	0,11	0,03
Br (%)	nd	nd	<0,01	<0,01	nd	-
Sr (%)	0,17	0,18	0,18	0,18	0,2	0,01
Ba (%)	nd	0,02	nd	nd	nd	-
Pb (%)	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	-

0,01% limite de quantificação FRX

nd: não detectado

Fonte: Adaptado de Bonifácio (2024)

Analisando os resultados, percebe-se uma variação na análise química para os lotes estudados na pesquisa, resultado esperado tendo em vista uma variação semelhante relatada por Bonifácio (2024) em seus lotes de estudo, com ressalva para os elementos Alumínio (Al), Silício (Si), Enxofre (S), Cálcio (Ca) e Ferro (Fe), que apresentaram variações de desvio padrão entre os autores.

4.1.2. Massa específica

Com a realização deste ensaio foi possível produzir a Tabela 15, contendo a referência do CP V e os resultados das amostras de KR e EGAF.

Tabela 15. Massa específica do CP V, lotes de KR e da EGAF.

	CP V	KR1	KR2	EGAF
ρ (g/cm ³)	3,03	2,86	2,98	2,87

Fonte: O autor (2024)

Analisando os resultados obtidos é possível notar que há uma diferença de 0,12 g/cm³ (4%) entre os lotes de KR. Tanto os valores quanto a variação entre eles

também foram relatadas por Bonifácio (2024), cujos valores variam de 2,86 até 2,98 g/cm³ para os 5 lotes de KR estudados pela autora.

É possível correlacionar os resultados de massa específica dos lotes de KR com os obtidos no ensaio de FRX por conta da quantidade de ferro (Fe) e cálcio (Ca) presente nas amostras.

4.1.3. Finura Blaine

Na Tabela 16 estão identificados os resultados para o ensaio de superfície específica e o D50 das amostras de KR, EGAF e para a referência do CP V.

Tabela 16. Superfície específica do CPV, lotes de KR e da EGAF.

	CP V	KR1	KR2	EGAF
S (cm ² /g)	3.844	3.190	2.887	3.864
D50 (μm)	11,37	18,72	18,54	10,74

Fonte: O autor (2024)

Analizando os resultados do ensaio é possível notar a diferença entre os lotes de KR de 303 cm²/g (9%), e que a média dos resultados para os lotes de KR (3.038 cm²/g) se diferencia em cerca de 21% do CP V, diferente da EGAF, cujo valor está próximo da referência. As diferenças percentuais se assemelham com o obtido por Bonifácio (2024).

É possível observar a correlação existente entre os resultados da superfície específica com os resultados do D50 obtidos na granulometria à laser, pois o D50 é o diâmetro da partícula em que 50% do material é passante, ou seja, quanto menor o valor de D50, mais fino é o material.

É importante destacar que não foi possível observar relação da finura com o incremento da resistência à compressão, que será apresentado e discutido no item 4.2.

4.1.4. Resíduo Insolúvel

Estão representados na Tabela 17 os resultados obtidos no ensaio de resíduo insolúvel para as amostras de KR, EGAF e para a referência do CP V.

Tabela 17. Resíduo insolúvel do CP V, lotes de KR e da EGAF

	CP V	KR1	KR2	EGAF
RI (%)	1,23	3,95	11,64	0,08

Fonte: O autor (2024)

A partir dos resultados obtidos é possível observar que os lotes de KR não apresentam uniformidade nos resultados, onde o lote 2 possui cerca de 3 vezes mais resíduo insolúvel do que o lote 1. Além disso, é possível notar que os valores obtidos para os 2 lotes são superiores ao valor encontrado para o CP V. Se comparados com Bonifácio (2024), o lote 1 apresentou menos resíduo insolúvel que todos os 5 lotes estudados pela autora, já o lote 2 se encontra dentro da faixa dos 5 lotes, que variam de 5,48 à 13,01% de resíduo insolúvel.

Com bases nos resultados, é possível observar a relação entre o percentual de resíduo insolúvel e a composição química dos materiais, onde o lote 2 tem quantidade superior de Ferro em sua composição.

Além disso, também se destaca a correlação entre os valores obtidos de resíduo insolúvel e resistência à compressão que estão apresentados no item 4.2, onde as amostras produzidas com lote 2 obtiveram maior desenvolvimento de f_{ck} aos 91 dias.

4.1.5. Perda ao Fogo

Com a realização do ensaio de perda ao fogo, foi possível a elaboração da Tabela 18, contendo os resultados para as amostras estudadas.

Tabela 18. Perda ao fogo do CP V, lotes de KR e da EGAF

	CP V	KR1	KR2	EGAF
PF (%)	4,33	13,5	9,89	gf*

*gf: ganho ao fogo

Fonte: O autor (2024)

Analizando os resultados é possível observar que a EGAF não teve perda de material para o fogo. O resultado era o esperado, visto que a temperatura de fusão do material está na faixa de 1.900 à 2.200°C, e a temperatura do ensaio é de 950±50°C, porém, é importante ressaltar que foram obtidos resultados de ganho de massa de menos de 1% de massa após o ensaio. O ocorrido só pode ser explicado por imprecisão do equipamento de medição, uma vez que o material não sofre alteração para a temperatura do ensaio. Por esse motivo o resultado da amostra é caracterizado como *ganho ao fogo* (gf).

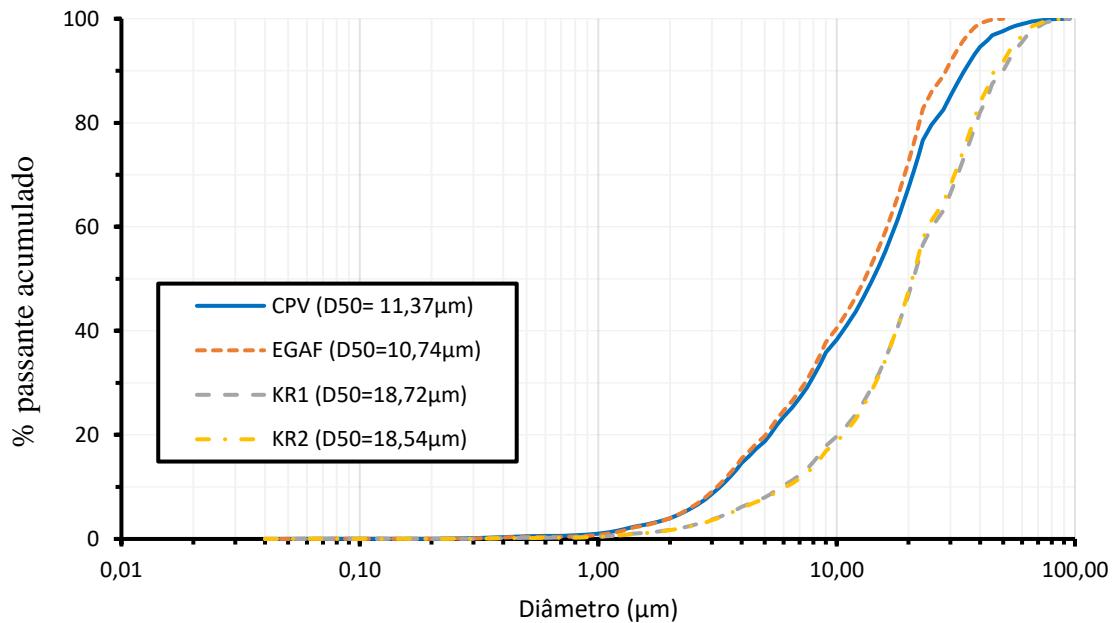
Para as amostras de KR, percebe-se que há uma diferença de 26% entre os lotes e uma diferença de 63% entre a média dos lotes (11,7%) e a referência do CP V. Se comparado com os resultados obtidos por Bonifácio (2024) é possível notar uma diferença de 20% entre a média dos resultados, porém, ao se analisar os resultados

individuais, é possível notar uma proximidade do lote 1 desta pesquisa com o lote 1 da autora, assim como entre o lote 2 desta pesquisa com o lote 3 da autora.

4.1.6. Granulometria à laser

Para essa pesquisa, foram realizados o ensaio de granulometria à laser para os materiais em estudo. O resultado pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2. Curvas granulométricas à Laser.



Fonte: O autor (2024)

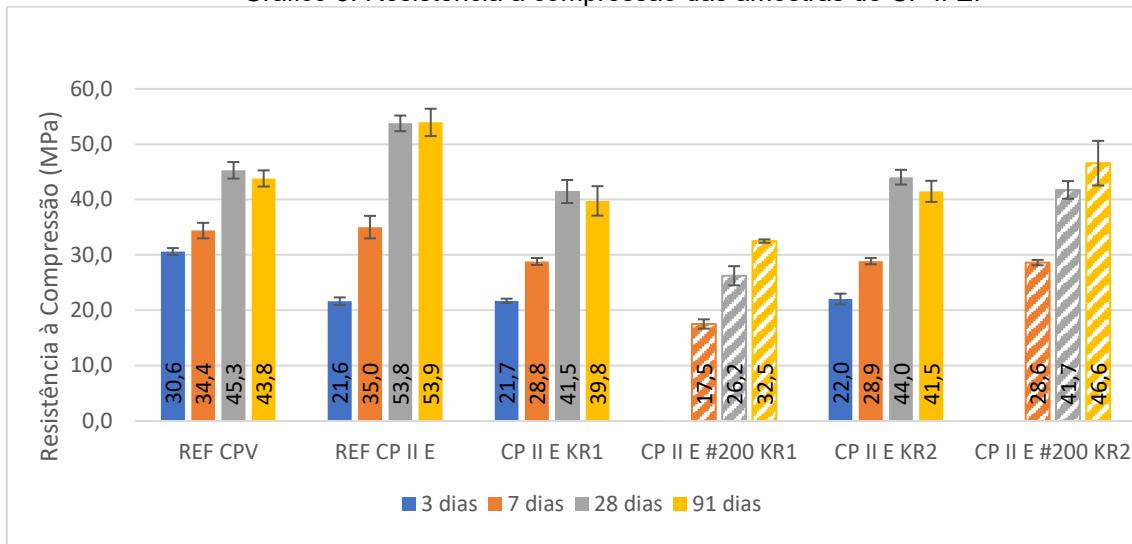
É possível notar, ao analisar os resultados, que a curva dos lotes de KR se aproxima para todas os diâmetros e que a EGAF possui granulometria semelhante ao CP V a partir da peneira de 20 μm .

4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para essa pesquisa, foi analisada a resistência característica à compressão (f_{ck}) das amostras nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias de cura, conforme a NBR 7215:2019.

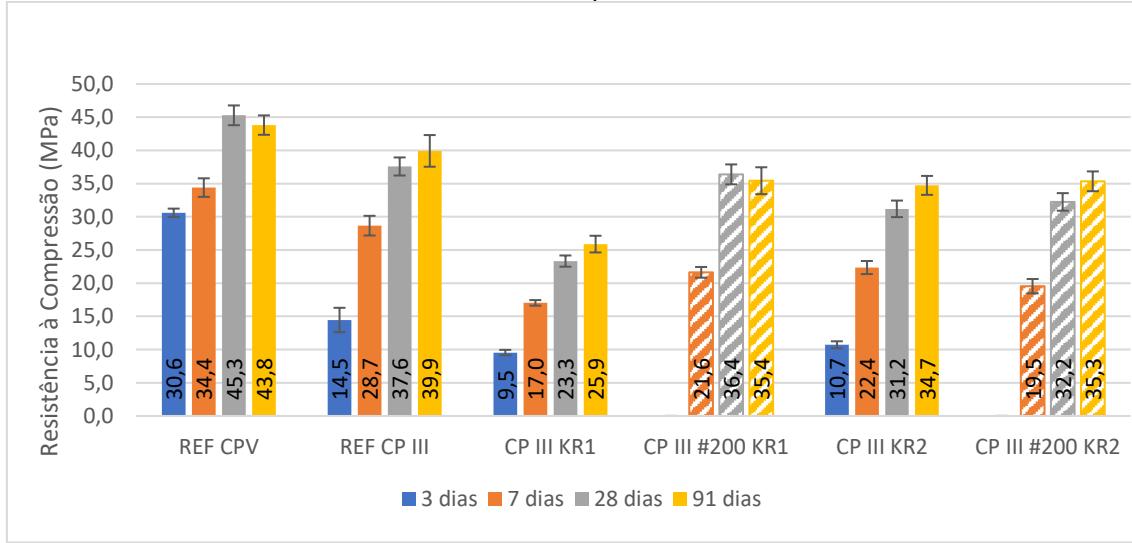
Os resultados obtidos para as amostras de CP II E estão resumidos no Gráfico 3 e no Gráfico 4 para o CP III. Os resultados individuais de cada rompimento podem ser observados no apêndice 1 localizado no item 7. As barras hachuradas correspondem as amostras de KR1 e KR2 beneficiadas, ou seja, utilizando somente o material passante na peneira 200 (abertura 0,075 mm).

Gráfico 3. Resistência à compressão das amostras de CP II E.



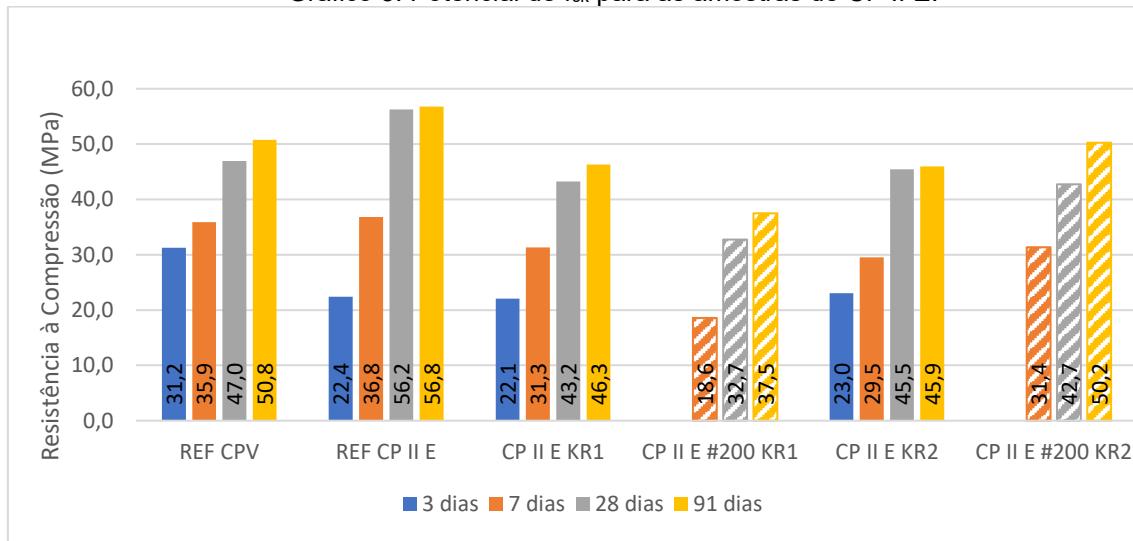
Fonte: O autor (2024)

Gráfico 4. Resistência à compressão das amostras de CP III.

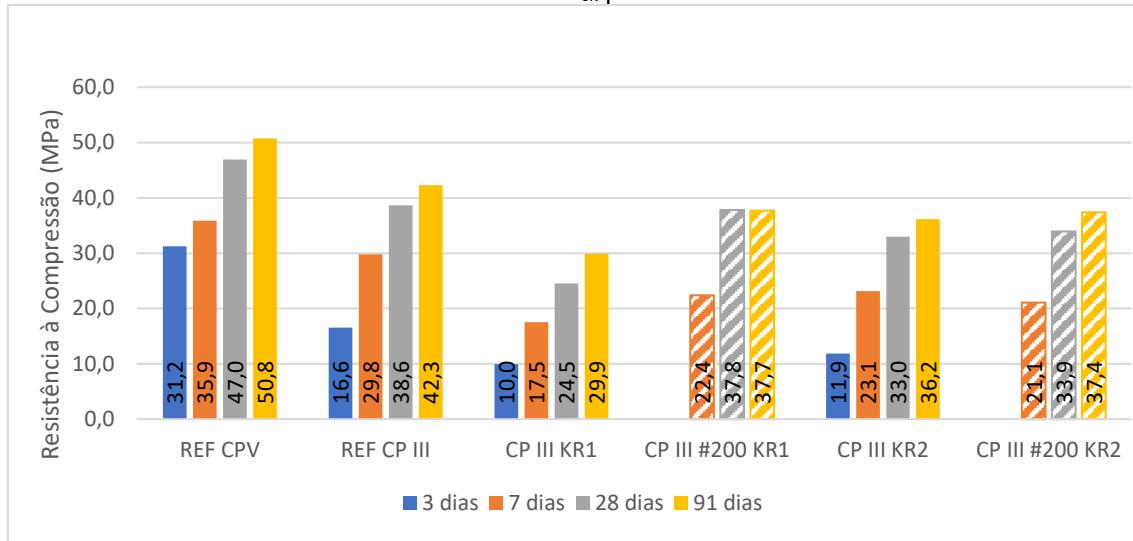


Fonte: O autor (2024)

Analizando os resultados obtidos, é possível notar primeiramente que para as amostras REF CPV, CP II E KR1, CP II E KR2 E CP III #200 KR 1 os resultados não seguem o esperado para o incremento proporcional com o tempo. Isso se dá por conta da metodologia informada pela NBR 7215:2019 que diz que deve ser desprezado o valor com maior desvio acima de 6% da média calculada, e para o caso das amostras citadas, o valor que se enquadra no quesito é o maior valor de f_{ck} obtido para a amostra. Essa metodologia acaba por desprezar o potencial que a amostra tem de resistência à compressão do corpo de prova. Por esse motivo, estão apresentados os resultados de potencial de resistência à compressão para as amostras de CP II E no Gráfico 5 e CP III no Gráfico 6.

Gráfico 5. Potencial de f_{ck} para as amostras de CP II E.

Fonte: O autor (2024)

Gráfico 6. Potencial de f_{ck} para as amostras de CP III.

Fonte: O autor (2024)

Quando comparados às amostras de referência, o resultado se encontra dentro do esperado, onde as amostras que tiveram a incorporação do coproduto KR sofrem uma redução na resistência à compressão para todas as idades. Na Tabela 19 e a Tabela 20 estão identificados a diferença percentual entre as referências de CP II E e CPIII, respectivamente, das amostras para cada idade com base nos resultados regidos pela NBR 7215:2019, ou seja, utilizando a média dos resultados.

Tabela 19. Diferença percentual do f_{ck} do CP II E segundo a NBR 7215:2019.

	CP II E KR1	CP II E #200 KR1	CP II E KR2	CP II E #200 KR2
3 dias	0,32%	-	1,85%	-
7 dias	-17,71%	-49,96%	-17,53%	-18,30%
28 dias	-22,89%	-51,20%	-18,08%	-22,35%
91 dias	-26,28%	-39,75%	-23,10%	-13,65%

Fonte: O autor (2024)

Tabela 20. Diferença percentual do f_{ck} do CP III segundo a NBR 7215:2019.

	CP III KR1	CP III #200 KR1	CP III KR2	CP III #200 KR2
3 dias	-33,97%	-	-25,85%	-
7 dias	-40,58%	-24,54%	-22,01%	-31,81%
28 dias	-37,92%	-3,17%	-16,98%	-14,21%
91 dias	-35,16%	-11,25%	-13,01%	-11,48%

Fonte: O autor (2024)

De forma similar, foram produzidos a Tabela 21 e a Tabela 22 com a diferença percentual das amostras para cada idade, também para o CP II E e CP III, respectivamente, dessa vez levando em consideração o potencial de resistência à compressão das amostras. Os valores negativos indicam queda da resistência em relação às referências produzidas, para CP II E e CP III em suas respectivas tabelas.

Tabela 21. Diferença percentual do f_{ck} do CP II E para cada idade.

	CP II E KR1	CP II E #200 KR1	CP II E KR2	CP II E #200 KR2
3 dias	-1,62%	-	2,75%	-
7 dias	-15,01%	-49,58%	-19,85%	-14,89%
28 dias	-23,13%	-41,78%	-19,17%	-24,02%
91 dias	-18,44%	-33,98%	-19,12%	-11,53%

Fonte: O autor (2024)

Tabela 22. Diferença percentual do f_{ck} do CP III para cada idade.

	CP III KR1	CP III #200 KR1	CP III KR2	CP III #200 KR2
3 dias	-39,75%	-	-28,20%	-
7 dias	-41,23%	-24,82%	-22,36%	-29,24%
28 dias	-36,55%	-2,14%	-14,57%	-12,19%
91 dias	-29,24%	-10,82%	-14,44%	-11,54%

Fonte: O autor (2024)

Os resultados eram esperados, visto que Dieguez (2018) afirmou em seu estudo que a incorporação do coproduto KR na mistura cimentícia reduziu o f_{ck} para todas as idades. A autora considera que a redução se deve pela estrutura cristalina do coproduto KR causando uma redução da concentração de C_3S , principal produto responsável pelo desenvolvimento da resistência do cimento.

Também foi possível notar a queda da resistência à compressão para os lotes de KR estudados por Bonifácio (2024), que utiliza o mesmo teor de substituição da EGAF pelo coproduto KR. As diferenças entre os resultados da autora e os resultados desta pesquisa podem ser explicados pela diferente composição química para cada lote de KR.

Pelos resultados obtidos, é possível afirmar que a substituição de 15% de EGAF pelo coproduto KR não contribui para a melhoria da resistência à compressão em todas as idades estudadas.

Outro ponto a ser observado é que para o Lote 2 do estudo, utilizar o passante na peneira de 75 μm do coproduto KR não obteve diferença significativa, já para o Lote 1, a utilização da mesma metodologia proporcionou resultados opostos para cada tipo de cimento, trazendo uma melhoria para o CP III, porém uma diminuição para o CP II E.

É importante citar que durante a realização da pesquisa um dos corpos de prova para a amostra REF CP III se quebrou durante o desmolde (Figura 26), portanto, a média obtida foi calculada com apenas 3 resultados, mesmo que o desvio relativo tenha sido maior que 6%.

Figura 26. Corpo de prova quebrado no processo de desmolde.



Fonte: O autor (2024)

Outro ponto a ser mencionado é que por conta de um erro de processo no LEMAC, os corpos de prova para a idade de 91 dias das amostras CP II E #200 KR1, CP III #200 KR1, CP II E #200 KR2 e CP III #200 KR2 foram descartados por engano, onde os corpos de prova foram arremessados de uma altura considerável numa caçamba, além de ficarem por horas fora da cura úmida. Dos 16 corpos de prova, 15 foram recuperados, com exceção de um CP para a amostra CP II E #200 KR2. Por esse motivo, os resultados podem ter sido comprometidos, podendo ser observado na evolução de resistência para o período entre 28 e 91 dias de cura.

5. CONCLUSÃO

A incorporação do coproduto KR como substituição parcial da escória granulada de alto forno mostrou-se promissora para a produção de cimentos compostos, conforme os resultados obtidos na presente pesquisa.

Analizando os resultados, é possível concluir que o material não se comporta de forma uniforme, onde fatores como a data de coleta e a variabilidade do processo de dessulfuração são fatores importantes que influenciam as características do material, gerando impactos em sua composição físico-química. fato que pode ser observado durante os ensaios de caracterização, onde foi observada variação em todos os ensaios realizados durante o estudo. Dentre as principais variações, destacam-se os resultados de área superficial resíduo insolúvel e perda ao fogo, tendo variações de 9,50%, 66,0% e 26,75% respectivamente entre os lotes, além da variação da composição de Ferro de 50,25% entre os lotes, fato observado na análise por FRX.

Com o intuito de obter diferentes resultados, decidiu-se estudar a utilização exclusiva da fração fina do material, ou seja, o passante na peneira 200 (com abertura de 75 μm). Além disso, buscou-se remover a parte metálica do coproduto utilizando um ímã, com o objetivo de avaliar o impacto dessas metodologias em comparação às amostras in natura. No entanto, conforme descrito na pesquisa, não foi possível coletar nenhum material residual após a passagem do ímã. Assim, optou-se por utilizar apenas o material passante na peneira 200. Apesar dos resultados individuais dos lotes de estudo, foi possível observar que as amostras do material contribuíram para o desenvolvimento da resistência à compressão axial do cimento para as argamassas produzidas com CP II E. Em comparação à referência inicial de CP V, os resultados foram próximos para as idades de 28 e 91 dias, com exceção das amostras compostas pelo passante na peneira 200 do lote 1 do coproduto KR, que obteve uma redução para todas as idades em cerca de 41% em média se comparado à referência do CP II E produzido. Se destaca a amostra produzida com lote 2 ‘in-natura’, que obteve uma média de cerca de 13,84% em relação ao REF CP II E, menor variação para as amostras de CP II E estudadas.

Assim como para o CP II E, as amostras produzidas com CP III trouxeram resultados similares, mas dessa vez para a referência de CP III, e não para a referência inicial de CP V, com exceção do lote 1 ‘in-natura’, que trouxe queda de

resistência de cerca de 37,25% em relação ao REF CP III e não foi possível identificar uma justificativa clara para esse fenômeno. Destaca-se a amostra produzida com lote 1 passante na peneira 200, com variação média de 12,59% em relação ao REF CP III, menor dentre todos os lotes presentes no estudo.

Analizando a composição química dos 2 lotes de coproduto KR obtidos com ensaio de FRX, não foi possível relacionar a variação nos resultados de resistência à compressão axial com a composição individual de cada lote.

Com base nos requisitos estabelecidos pela NBR 16697:2018 para classe de resistência, que representa o valor mínimo do f_{ck} para 28 dias, é possível concluir que tanto a referência quanto as amostras de CP II E se enquadram na classe de resistência de 40MPa, com exceção da amostra CP II E #200 KR1 que se enquadra na classe de resistência de 32MPa. Realizando a mesma análise para o CP III, as amostras se enquadram na classe de resistência de 32MPa, com exceção da amostra CP III KR1, que obteve resistência à compressão aos 28 dias de 25MPa, obtendo assim a classificação de CP III - 25.

Por fim, conclui-se que a incorporação do coproduto KR tem influência no desenvolvimento de resistência à compressão do cimento, sendo possível obter desempenho mecânico que satisfaça os requisitos para classificação quanto à resistência à compressão presentes na NBR 16697:2018.

6. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Visando incentivar o uso do coproduto KR como adição mineral para o cimento Portland, são sugeridos os seguintes pontos a serem abordados em pesquisas futuras:

- Realizar a lavagem do material visando a separação das partículas metálicas, para que seja possível a retirada com imã, reduzindo a quantidade dessas partículas na composição final da argamassa;
- Realizar ensaios para estado fresco das argamassas produzidas com as amostras do coproduto KR, visando aumentar o número de dados experimentais que permitam justificar o comportamento do material na incorporação no cimento;
- Avaliar a substituição do coproduto KR em diferentes teores de substituição da escória granulada de alto forno e até mesmo do cimento Portland, visando a produção de cimentos com maior percentual de KR que satisfaçam a NBR 16697:2018;
- Realizar ensaios de caracterização para as amostras de coproduto KR que sofram alteração da condição 'in-natura', como com o passante da peneira 200 ou, se possível, com o material restante da passagem do imã, avaliando quesitos como finura e resíduo insolúvel dessas amostras;
- Avaliar a utilização do coproduto KR moído, buscando aproximar a curva granulométrica do material à curva do cimento Portland;
- Realizar programa experimental completo, avaliando as propriedades dos cimentos compostos antes da hidratação, no estado fresco e endurecido, que permitam satisfazer todos os requisitos da NBR 16697:2018, sendo possível classificar e categorizar o cimento composto produzido.

7. APÊNDICE

APENDICE 1 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A) Referência CPV

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
50,00	50,40	98,36	6170	50,20	5,02	19,79	311,74	30,57	30,61	0,11%		
49,92	49,88	95,97	6230	49,90	4,99	19,56	318,56	31,24		2,07%		
49,97	49,98	98,56	6170	49,98	5,00	19,62	314,55	30,85		0,79%		
49,95	49,72	96,70	5920	49,84	4,98	19,51	303,50	29,76		2,75%		
7 DIAS												
50,28	50,15	96,29	6570	50,22	5,02	19,80	331,75	32,53	34,40	5,42%		
50,42	50,31	97,17	7070	50,37	5,04	19,92	354,87	34,80		1,18%		
50,23	50,21	97,63	7250	50,22	5,02	19,81	366,01	35,89		4,35%		
50,08	50,07	97,88	6900	50,08	5,01	19,69	350,36	34,36		0,11%		
28 DIAS												
50,42	50,37	97,59	9550	50,40	5,04	19,95	478,78	46,95	44,23	6,15%	45,28	3,69%
50,62	51,03	97,16	8500	50,83	5,08	20,29	418,96	41,09		7,11%		
50,23	50,21	98,52	9050	50,22	5,02	19,81	456,88	44,81		1,29%		1,05%
50,09	50,04	97,15	8850	50,07	5,01	19,69	449,56	44,09		0,33%		2,64%
91 DIAS												
50,25	49,98	95,55	9150	50,12	5,01	19,73	463,87	45,49	45,55	0,13%	43,81	3,84%
50,22	50,2	96,78	10250	50,21	5,02	19,80	517,67	50,77		11,46%		
50,26	49,85	96,57	8600	50,06	5,01	19,68	437,03	42,86		5,90%		2,17%
50,3	50,54	96,46	8770	50,42	5,04	19,97	439,24	43,08		5,43%		1,67%

B) Referência CP II E

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
50,25	50,24	98,60	4280	50,25	5,02	19,83	215,86	21,17	21,00	0,81%	21,63	2,15%
49,98	49,85	98,62	3810	49,92	4,99	19,57	194,70	19,09		9,07%		
50,26	50,17	98,39	4530	50,22	5,02	19,80	228,74	22,43		6,82%		3,69%
49,72	49,75	98,15	4220	49,74	4,97	19,43	217,22	21,30		1,44%		1,54%
7 DIAS												
50,39	50,14	97,37	6720	50,27	5,03	19,84	338,65	33,21	35,02	5,17%		
50,47	50,10	97,63	7460	50,29	5,03	19,86	375,64	36,84		5,19%		
49,96	49,96	97,42	7340	49,96	5,00	19,60	374,42	36,72		4,85%		
50,23	49,99	97,04	6700	50,11	5,01	19,72	339,73	33,32		4,87%		
28 DIAS												
50,13	50,05	98,43	11300	50,09	5,01	19,71	573,44	56,24	53,03	6,04%	53,76	
50,08	50,27	99,59	10250	50,18	5,02	19,77	518,39	50,84		4,13%		5,44%
50,03	50,10	98,55	10750	50,07	5,01	19,69	546,07	53,55		0,98%		0,39%
49,87	50,08	99,08	10300	49,98	5,00	19,62	525,10	51,50		2,89%		4,21%
91 DIAS												
50,12	50,16	96,19	10800	50,14	5,01	19,75	546,97	53,64	53,94	0,55%		
50,17	50,44	98,47	10300	50,31	5,03	19,88	518,23	50,82		5,77%		
50,15	50,26	96,79	11000	50,21	5,02	19,80	555,66	54,49		1,03%		
50,17	50,18	97,42	11450	50,18	5,02	19,77	579,08	56,79		5,29%		

C) Referência CP III

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
49,80	49,88	97,66	2710	49,84	4,98	19,51	138,91	13,62	14,46	5,78%		
49,86	50,06	95,94	3310	49,96	5,00	19,60	168,85	16,56		14,53%		
50,14	50,02	98,76	2650	50,08	5,01	19,70	134,53	13,19		8,75%		
7 DIAS												
50,27	50,03	95,71	6000	50,15	5,02	19,75	303,75	29,79	25,56	16,54%	28,66	3,92%
50,12	49,39	97,39	5350	49,76	4,98	19,44	275,16	26,99		5,58%		5,86%
50,25	50,09	96,00	5890	50,17	5,02	19,77	297,95	29,22		14,32%		1,94%
50,06	50,05	95,38	3260	50,06	5,01	19,68	165,67	16,25		36,44%		
28 DIAS												
50,07	50,02	97,62	7750	50,05	5,00	19,67	393,99	38,64	37,58	2,82%		
50,46	50,43	96,85	7800	50,45	5,04	19,99	390,27	38,27		1,85%		
50,16	49,99	96,51	7150	50,08	5,01	19,69	363,06	35,60		5,25%		
50,09	49,79	98,62	7550	49,94	4,99	19,59	385,44	37,80		0,59%		
91 DIAS												
50,14	50,32	95,17	8300	50,23	5,02	19,82	418,85	41,08	39,93	2,88%		
50,21	50,09	96,53	7400	50,15	5,02	19,75	374,63	36,74		7,98%		
49,74	49,59	94,15	8350	49,67	4,97	19,37	431,02	42,27		5,87%		
50,03	50,08	94,67	7950	50,06	5,01	19,68	404,00	39,62		0,77%		

D) CP II E KR1

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
50,12	50,01	98,15	4430	50,07	5,01	19,69	225,03	22,07	21,70	1,69%		
49,81	50,04	98,67	4280	49,93	4,99	19,58	218,63	21,44		1,21%		
50,10	50,09	98,70	4280	50,10	5,01	19,71	217,15	21,30		1,88%		
49,34	49,45	98,66	4300	49,40	4,94	19,16	224,39	22,01		1,40%		
7 DIAS												
50,25	50,11	97,40	5910	50,18	5,02	19,78	298,84	29,31	29,44	0,46%	28,82	1,69%
49,87	49,87	97,75	5600	49,87	4,99	19,53	286,69	28,12		4,51%		2,44%
50,02	49,99	97,92	6270	50,01	5,00	19,64	319,26	31,31		6,34%		
49,96	49,92	97,98	5800	49,94	4,99	19,59	296,10	29,04		1,37%		0,76%
28 DIAS												
50,34	49,72	97,65	7850	50,03	5,00	19,66	399,32	39,16	39,92	1,91%	41,46	5,53%
49,90	49,78	98,12	8600	49,84	4,98	19,51	440,81	43,23		8,28%		4,28%
49,86	49,82	97,63	8350	49,84	4,98	19,51	428,00	41,97		5,13%		1,25%
50,19	49,99	97,36	7100	50,09	5,01	19,71	360,30	35,33		11,50%		
91 DIAS												
50,2	50,21	98,23	9350	50,21	5,02	19,80	472,31	46,32	41,40	11,88%	39,76	
51,19	51,16	98,44	8900	51,18	5,12	20,57	432,70	42,43		2,50%		6,72%
50,01	49,96	98,92	7950	49,99	5,00	19,62	405,13	39,73		4,03%		0,08%
50,15	50,31	98,43	7500	50,23	5,02	19,82	378,48	37,12		10,35%		6,65%

E) CP II E KR1 #200

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
7 DIAS												
50,21	50,21	95,87	3750	50,21	5,02	19,80	189,39	18,57	17,52	5,99%		
50,19	50,29	97,13	3550	50,24	5,02	19,82	179,08	17,56		0,22%		
49,95	50,05	95,96	3310	50,00	5,00	19,63	168,58	16,53		5,66%		
50,22	50,08	96,42	3510	50,15	5,02	19,75	177,70	17,43		0,55%		
28 DIAS												
49,97	49,91	96,85	6540	49,94	4,99	19,59	333,87	32,74	27,86	17,51%	26,24	
50,35	50,16	96,61	4910	50,26	5,03	19,84	247,53	24,28		12,88%		7,48%
50,40	50,13	96,72	5440	50,27	5,03	19,84	274,14	26,89		3,51%		2,47%
49,95	50,17	96,79	5530	50,06	5,01	19,68	280,97	27,55		1,11%		5,02%
91 DIAS												
51,2	51,25	96,95	6900	51,23	5,12	20,61	334,81	32,83	33,75	2,70%	32,50	1,04%
50,23	50,39	98,96	7600	50,31	5,03	19,88	382,31	37,49		11,10%		
50,16	50,17	96,74	6500	50,17	5,02	19,76	328,87	32,25		4,43%		0,75%
50,23	50,25	98,84	6550	50,24	5,02	19,82	330,41	32,40		3,98%		0,29%

F) CP II E KR2

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
50,09	50,07	96,91	4350	50,08	5,01	19,70	220,84	21,66	22,04	1,72%		
50,03	50,11	97,53	4530	50,07	5,01	19,69	230,07	22,56		2,39%		
49,97	50,04	97,75	4180	50,01	5,00	19,64	212,84	20,87		5,27%		
50,26	50,12	97,10	4650	50,19	5,02	19,78	235,03	23,05		4,60%		
7 DIAS												
49,80	50,10	96,51	5900	49,95	5,00	19,60	301,09	29,53	28,88	2,24%		
49,83	50,24	96,49	5800	50,04	5,00	19,66	294,98	28,93		0,17%		
50,02	49,86	97,44	5780	49,94	4,99	19,59	295,08	28,94		0,20%		
49,75	49,70	97,41	5570	49,73	4,97	19,42	286,82	28,13		2,60%		
28 DIAS												
49,98	49,89	96,46	8550	49,94	4,99	19,58	436,58	42,82	42,94	0,28%	44,04	2,78%
49,92	50,18	96,17	7950	50,05	5,01	19,67	404,08	39,63		7,71%		
50,04	50,08	96,32	8800	50,06	5,01	19,68	447,11	43,85		2,12%		0,44%
50,18	50,36	96,64	9200	50,27	5,03	19,85	463,53	45,46		5,87%		0,39%
91 DIAS												
49,81	50,14	97	8150	49,98	5,00	19,62	415,49	40,75	42,59	4,33%	41,48	1,76%
50,13	50,16	97,21	9250	50,15	5,01	19,75	468,38	45,93		7,85%		
50,13	49,94	96,73	8750	50,04	5,00	19,66	445,01	43,64		2,47%		5,22%
50,18	50,03	97,19	8050	50,11	5,01	19,72	408,27	40,04		5,99%		3,47%

G) CP II E KR2 #200

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
7 DIAS												
50,04	49,96	98,17	5840	50,00	5,00	19,63	297,43	29,17	29,30	0,44%	28,61	1,95%
50,13	50,01	97,94	5690	50,07	5,01	19,69	288,98	28,34		3,27%		0,95%
49,88	49,90	97,35	6250	49,89	4,99	19,55	319,72	31,35		7,02%		
50,05	50,20	97,68	5700	50,13	5,01	19,73	288,85	28,33		3,31%		0,99%
28 DIAS												
49,99	50,08	98,96	8550	50,04	5,00	19,66	434,84	42,64	41,75	2,15%		
50,07	50,19	99,98	8600	50,13	5,01	19,74	435,73	42,73		2,36%		
50,14	49,96	98,96	7900	50,05	5,01	19,67	401,54	39,38		5,67%		
50,24	50,03	99,06	8500	50,14	5,01	19,74	430,57	42,23		1,15%		
91 DIAS												
								46,57				
50,2	50,25	99,4	10150	50,23	5,02	19,81	512,31	50,24		7,88%		
51,51	51,35	98,66	10000	51,43	5,14	20,77	481,37	47,21		1,36%		
50,01	50,21	97,97	8500	50,11	5,01	19,72	431,00	42,27		9,24%		

H) CP III KR1

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
49,90	49,98	97,72	1720	49,94	4,99	19,59	87,81	8,61	9,31	7,53%	9,55	
49,93	50,04	98,48	1900	49,99	5,00	19,62	96,82	9,50		1,96%		0,54%
50,05	50,01	97,06	2000	50,03	5,00	19,66	101,74	9,98		7,13%		4,51%
50,17	50,22	98,18	1850	50,20	5,02	19,79	93,49	9,17		1,55%		3,97%
7 DIAS												
50,15	50,20	94,54	3530	50,18	5,02	19,77	178,53	17,51	16,35	7,08%	17,03	2,79%
49,98	50,17	96,51	3390	50,08	5,01	19,69	172,13	16,88		3,24%		0,90%
49,95	50,16	97,67	2870	50,06	5,01	19,68	145,85	14,30		12,53%		
49,99	50,07	96,81	3350	50,03	5,00	19,66	170,41	16,71		2,21%		1,89%
28 DIAS												
50,33	50,12	97,70	4600	50,23	5,02	19,81	232,18	22,77	23,33	2,39%		
50,08	50,03	97,62	4550	50,06	5,01	19,68	231,22	22,68		2,80%		
50,22	50,05	97,92	4700	50,14	5,01	19,74	238,08	23,35		0,09%		
49,66	50,25	97,47	4900	49,96	5,00	19,60	250,00	24,52		5,10%		
91 DIAS												
49,76	50,34	97,76	6000	50,05	5,01	19,67	304,97	29,91	26,89	11,21%	25,89	
49,97	49,93	97,11	5300	49,95	5,00	19,60	270,47	26,52		1,37%		2,46%
50,32	50,26	96,43	4950	50,29	5,03	19,86	249,20	24,44		9,12%		5,60%
49,9	50,14	96,34	5350	50,02	5,00	19,65	272,26	26,70		0,72%		3,14%

I) CP III KR1 #200

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio Recalculada (Mpa)	Média recalculado	Desvio recalculado
7 DIAS												
50,14	50,04	98,09	4500	50,09	5,01	19,71	228,36	22,40	21,63	3,53%		
50,56	50,58	95,94	4450	50,57	5,06	20,09	221,56	21,73		0,45%		
49,70	49,65	96,20	4050	49,68	4,97	19,38	208,97	20,49		5,26%		
50,15	50,23	96,16	4420	50,19	5,02	19,78	223,41	21,91		1,28%		
28 DIAS												
50,15	50,11	96,76	7610	50,13	5,01	19,74	385,57	37,81	36,39	3,92%		
50,09	50,31	95,50	7300	50,20	5,02	19,79	368,83	36,17		0,59%		
50,09	49,94	96,91	7450	50,02	5,00	19,65	379,20	37,19		2,20%		
50,13	50,14	96,61	6920	50,14	5,01	19,74	350,54	34,38		5,52%		
91 DIAS												
50,06	50,13	98,53	7000	50,10	5,01	19,71	355,16	34,83	34,56	1,45%	35,44	1,71%
50,02	50	96,9	7550	50,01	5,00	19,64	384,36	37,69		6,65%		6,38%
50,02	50,03	95,17	6400	50,03	5,00	19,65	325,62	31,93		9,65%		
50,16	50,11	97,92	6800	50,14	5,01	19,74	344,46	33,78		4,42%		4,67%

J) CP III KR2

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
3 DIAS												
49,90	49,88	96,55	2370	49,89	4,99	19,55	121,24	11,89	11,01	7,96%	10,72	
49,90	49,95	97,24	2100	49,93	4,99	19,58	107,27	10,52		4,47%		1,87%
50,14	49,94	95,94	2270	50,04	5,00	19,67	115,43	11,32		2,79%		5,59%
49,76	49,84	97,25	2050	49,80	4,98	19,48	105,25	10,32		6,28%		3,72%
7 DIAS												
50,22	50,08	96,64	4570	50,15	5,02	19,75	231,36	22,69	21,88	3,69%	22,35	1,50%
49,85	49,87	96,20	4230	49,86	4,99	19,53	216,64	21,25		2,90%		4,96%
50,10	50,06	96,19	4110	50,08	5,01	19,70	208,65	20,46		6,48%		
49,80	49,87	97,36	4600	49,84	4,98	19,51	235,83	23,13		5,70%		3,46%
28 DIAS												
50,11	50,27	96,05	6250	50,19	5,02	19,78	315,90	30,98	31,20	0,70%		
49,88	50,12	97,37	6050	50,00	5,00	19,63	308,12	30,22		3,14%		
50,04	50,27	97,06	6650	50,16	5,02	19,76	336,59	33,01		5,81%		
50,08	50,14	97,36	6150	50,11	5,01	19,72	311,84	30,58		1,97%		
91 DIAS												
50,24	50,21	95,67	7000	50,23	5,02	19,81	353,32	34,65	34,73	0,23%		
50,23	50	95,47	7100	50,12	5,01	19,73	359,94	35,30		1,64%		
50,08	49,98	94,51	7250	50,03	5,00	19,66	368,80	36,17		4,14%		
50,04	50,2	93,52	6600	50,12	5,01	19,73	334,53	32,81		5,54%		

K) CP III KR2 #200

L1 (mm)	L2 (mm)	H (mm)	Carga (kgf)	L médio (mm)	L medio (cm)	área (cm ²)	Tensão (kgf/cm ²)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Desvio	Média Recalculada (Mpa)	Desvio recalculado
7 DIAS												
49,97	50,03	99,35	4220	50,00	5,00	19,63	214,92	21,08	19,39	8,71%	19,55	7,84%
50,13	50,15	98,42	4010	50,14	5,01	19,75	203,09	19,92		2,72%		1,90%
49,85	49,91	96,11	3770	49,88	4,99	19,54	192,93	18,92		2,42%		3,20%
50,23	50,16	98,75	3560	50,20	5,02	19,79	179,90	17,64		9,01%		
28 DIAS												
50,05	50,00	96,45	6800	50,03	5,00	19,65	345,98	33,93	32,24	5,24%		
50,18	50,09	96,36	6300	50,14	5,01	19,74	319,13	31,30		2,93%		
49,94	50,16	97,00	6550	50,05	5,01	19,67	332,92	32,65		1,27%		
50,16	50,05	96,22	6250	50,11	5,01	19,72	316,98	31,09		3,58%		
91 DIAS												
50,92	51,01	97,4	7300	50,97	5,10	20,40	357,84	35,09	35,34	0,71%		
49,8	50,06	96,9	6750	49,93	4,99	19,58	344,74	33,81		4,34%		
50,02	50,07	97,19	7500	50,05	5,00	19,67	381,29	37,39		5,80%		
50,01	50,18	96,24	7050	50,10	5,01	19,71	357,69	35,08		0,75%		

APENDICE 2 – ENSAIOS DE GRANULOMETRIA À LASER

A) CP V ARI

Results					
Name	D10 Volume (μm)	D50 Volume (μm)	D90 Volume (μm)	Mean Size Volume (μm)	Span (μm)
CPV 1	2,11935554	12,2228151	36,7725051	16,9265618	2,83512017
CPV 2	2,01269336	11,1315713	28,8725229	14,0320539	2,41294142
CPV 3	1,97857282	10,7705244	28,1035452	13,6627183	2,42559892
Average	2,03687391	11,3749703	31,2495244	14,873778	2,55788684
Distribution average					
Size distribution					
Particle diameter	Surface weighted	Volume weighted	Number weighted		
[μm]	[%]	[%]	[%]		
0,01	0	0	0		
0,04	4,47783779	0,02892942	86,4670752		
0,07	0,73916607	0,00834899	4,58746424		
0,1	1,17601698	0,01906789	3,80311744		
0,2	2,9127851	0,09460666	2,40579589		
0,3	4,37259582	0,21300722	1,6037993		
0,4	2,38500905	0,15482057	0,4896742		
0,5	0,63707877	0,05152331	0,08113848		
0,6	0,41055212	0,03975278	0,03540019		
0,7	0,5758816	0,06512643	0,03677549		
0,8	1,08692775	0,14078252	0,05421123		
0,9	1,34918282	0,19669087	0,05340008		
1	1,54304886	0,25001283	0,04960685		
1,1	1,67683027	0,29891773	0,04460599		
1,2	1,80481993	0,35101766	0,04037516		
1,3	1,91974274	0,40454439	0,03664354		
1,4	2,02883865	0,46045315	0,03341525		
1,6	2,10391991	0,54577164	0,02656539		
1,8	2,25469782	0,65806346	0,02251726		
2	2,34660936	0,76102815	0,01899339		
2,2	2,40658784	0,85856152	0,01610677		
2,4	2,41782459	0,94099917	0,01359964		
2,6	2,3964548	1,01040146	0,01148487		
2,8	2,355317	1,06941385	0,00973103		
3	2,30518552	1,12136525	0,00829348		
3,2	2,23549058	1,15992958	0,00706722		
3,4	2,18131275	1,20253111	0,00610708		
3,6	2,12719237	1,24162868	0,00531062		
3,8	2,0774152	1,27995895	0,00465517		
4	2,03076858	1,3170766	0,00410619		
4,3	1,95411231	1,36243358	0,00341928		
4,6	1,90806164	1,42314551	0,00291739		

5	1,84903802	1,49910194	0,00239344
5,3	1,84129495	1,58249009	0,00212209
5,6	1,82415435	1,6565284	0,00188367
6	1,79414523	1,74572085	0,00161432
6,5	1,7685447	1,86430503	0,00135665
7	1,7591965	1,99719875	0,00116406
7,5	1,75165423	2,13075887	0,00101009
8	1,74010668	2,25786064	0,00088211
8,5	1,72975583	2,38473846	0,00077684
9	1,70414418	2,48759454	0,00068257
10	1,61028722	2,61158966	0,00052212
11	1,53127516	2,73141129	0,0004098
12	1,45076211	2,82261828	0,00032581
13	1,37247924	2,89237224	0,00026226
14	1,29618521	2,94136132	0,00021335
15	1,22431099	2,97641823	0,00017542
16	1,15648718	2,99880311	0,00014559
17	1,0969633	3,02240046	0,00012235
18	1,04335925	3,04419341	0,00010386
19	0,99861507	3,07625696	8,9334E-05
20	0,94879731	3,07707493	7,665E-05
21	0,89876378	3,06087259	6,5885E-05
22	0,8483919	3,02714246	5,6678E-05
23	0,79787782	2,97633296	4,8763E-05
25	0,71075581	2,88176556	3,674E-05
28	0,5859233	2,66029808	2,4111E-05
30	0,49022477	2,38400772	1,7534E-05
32	0,41176966	2,13502581	1,2913E-05
34	0,34410978	1,89395562	9,5215E-06
36	0,28461126	1,65614247	6,9844E-06
38	0,23001894	1,4092606	5,0198E-06
40	0,18772417	1,20747971	3,6639E-06
43	0,14343727	0,98791083	2,3907E-06
45	0,11228127	0,80561598	1,6838E-06
50	0,07498345	0,59279758	8,8743E-07
53	0,05234865	0,43501739	5,3721E-07
56	0,04019129	0,35101055	3,6342E-07
60	0,02802243	0,25979923	2,146E-07
63	0,02233421	0,21741622	1,5514E-07
66	0,01801726	0,18374416	1,1403E-07
71	0,01270876	0,13942553	6,9505E-08
75	0,00782848	0,09072347	3,8369E-08
80	0,00486744	0,06016876	2,0968E-08
85	0,00267633	0,03515116	1,0213E-08
90	0,00131068	0,01822715	4,4611E-09
95	0	0	0
100	0	0	0

B) EGAF

Results					
Name	D10 Volume (μm)	D50 Volume (μm)	D90 Volume (μm)	Mean Size Volume (μm)	Span (μm)
EGAF 1	2,12524731	10,3634988	25,9139005	12,8218207	2,29542683
EGAF 2	2,15126012	10,8392907	26,1187848	13,1324103	2,21117094
EGAF 3	2,18770025	11,0390852	26,0532024	13,2442685	2,1619094
Average	2,15473589	10,7472916	26,0286292	13,0661665	2,22283572

Distribution average			
Size distribution			
Particle diameter	Surface weighted	Volume weighted	Number weighted
[μm]	[%]	[%]	[%]
0,01	0	0	0
0,04	2,3239633	0,01478576	86,3964805
0,07	0,18717386	0,00207988	2,23471174
0,1	0,68291393	0,01085461	4,04184809
0,2	2,25397604	0,07168497	3,34610384
0,3	3,42569255	0,16343372	2,26116655
0,4	1,65140565	0,10501899	0,61216771
0,5	0,23175289	0,01841334	0,05513453
0,6	0,15674343	0,01497852	0,02645361
0,7	0,35075234	0,03912952	0,04353417
0,8	1,01975759	0,13000853	0,09646407
0,9	1,35657921	0,19457386	0,10136168
1	1,61385821	0,25718723	0,09762887
1,1	1,80933943	0,31719794	0,09049201
1,2	1,97800724	0,37829357	0,08311956
1,3	2,129374	0,44119538	0,07625445
1,4	2,2634678	0,50504904	0,0698805
1,6	2,36011859	0,60185217	0,05578254
1,8	2,53649388	0,72769161	0,04736738
2	2,63682352	0,84053915	0,03988545
2,2	2,70525327	0,94860869	0,03382109
2,4	2,70413501	1,03444273	0,02841126
2,6	2,66892877	1,10610633	0,02389997
2,8	2,60700131	1,16359949	0,02013482
3	2,53359038	1,21165793	0,01705061
3,2	2,43732921	1,24339743	0,01442183
3,4	2,36252099	1,28057841	0,01238479
3,6	2,29056442	1,31460878	0,01071063
3,8	2,22454606	1,34760221	0,00933423
4	2,16448316	1,38019989	0,00819572
4,3	2,07203644	1,42025031	0,00678663
4,6	2,01527167	1,47758315	0,00576459
5	1,94906867	1,55313349	0,00471559
5,3	1,9414663	1,63967839	0,00417667

5,6	1,92686982	1,71929287	0,00371048
6	1,90102598	1,81717263	0,00318629
6,5	1,8807237	1,9472946	0,0026832
7	1,88766142	2,10453162	0,00231977
7,5	1,89784595	2,26676736	0,00202998
8	1,90452253	2,42617001	0,00178916
8,5	1,91474457	2,59142992	0,00159238
9	1,89871668	2,72074829	0,00140783
10	1,80310452	2,87066192	0,00108244
11	1,71549411	3,00417881	0,00085083
12	1,62098141	3,09664089	0,0006754
13	1,52535866	3,15676096	0,00054148
14	1,43595527	3,20029122	0,00043949
15	1,35426613	3,23377209	0,00036103
16	1,28084585	3,26229364	0,00030007
17	1,2203768	3,30249452	0,00025323
18	1,16884674	3,34902894	0,0002163
19	1,13333979	3,42761464	0,0001882
20	1,08050962	3,43980999	0,00016192
21	1,0227216	3,41865296	0,00013901
22	0,95927811	3,35931506	0,00011881
23	0,89251972	3,26770501	0,00010116
25	0,77538372	3,08590351	7,4411E-05
28	0,60480033	2,69608058	4,6293E-05
30	0,4680061	2,23547706	3,122E-05
32	0,36045834	1,8366653	2,1142E-05
34	0,27083379	1,46632949	1,4076E-05
36	0,19431541	1,11397868	9,0107E-06
38	0,12019915	0,7274212	5,0046E-06
40	0,07689545	0,48987338	2,8906E-06
43	0,03998867	0,2738806	1,3015E-06
45	0,01902094	0,13634721	5,6545E-07
50	0	0	2,7573E-23
53	0	0	0
56	0	0	0
60	0	0	0
63	0	0	0
66	0	0	0
71	0	0	0
75	0	0	0
80	0	0	0
85	0	0	0
90	0	0	0
95	0	0	0
100	0	0	0

C) LOTE 1 KR

Results					
Name	D10 Volume (μm)	D50 Volume (μm)	D90 Volume (μm)	Mean Size Volume (μm)	Span (μm)
J - KR1 1	4,48585444	18,9362394	45,7023073	23,322397	2,17659125
J - KR1 2	4,77221252	18,8634959	44,9906958	23,09498	2,13208004
J - KR1 3	4,11444068	18,360498	44,5894929	22,6755351	2,20446375
Average	4,45750255	18,7200778	45,0941653	23,0309707	2,17104502

Distribution average			
Size distribution			
Particle diameter	Surface weighted	Volume weighted	Number weighted
[μm]	[%]	[%]	[%]
0,01	0	0	0
0,04	2,68266411	0,01037652	59,2928391
0,07	0,23410763	0,00158654	1,69520632
0,1	0,59617001	0,00581572	2,16072322
0,2	2,13227006	0,04124994	12,6896053
0,3	3,18601911	0,09267153	5,83692989
0,4	1,67384493	0,06462874	2,94853976
0,5	0,2825994	0,01282338	1,86593768
0,6	0,29912117	0,0161705	1,5972994
0,7	0,38777281	0,02454077	1,41952045
0,8	0,74946263	0,05552814	1,3658784
0,9	0,97404505	0,08164397	1,25299492
1	1,15750125	0,10806391	1,14956127
1,1	1,3033549	0,13396564	1,05624261
1,2	1,41617587	0,15900574	0,93833598
1,3	1,5146421	0,18448925	0,82767315
1,4	1,58727757	0,2084752	0,7245918
1,6	1,62682283	0,2447186	0,53717987
1,8	1,71691896	0,29120342	0,42034788
2	1,75704581	0,3316462	0,33184622
2,2	1,77738811	0,36955616	0,26505553
2,4	1,76176695	0,39989621	0,21536488
2,6	1,71999772	0,42312023	0,1765715
2,8	1,67288626	0,44323832	0,14739695
3	1,61927243	0,45965617	0,12435126
3,2	1,5548447	0,47061454	0,10613342
3,4	1,51989487	0,48862386	0,09299969
3,6	1,49518189	0,50868881	0,08302014
3,8	1,47712416	0,53017531	0,07492139
4	1,47044148	0,55526363	0,06847344
4,3	1,4553958	0,59034311	0,06016011
4,6	1,47510223	0,63972124	0,05429067
5	1,49441247	0,70417406	0,04714914
5,3	1,56191225	0,78004566	0,04409069

5,6	1,60894964	0,84897093	0,04077733
6	1,65101383	0,93349876	0,03636603
6,5	1,70774565	1,04625152	0,03189161
7	1,79617468	1,1854714	0,02865195
7,5	1,88329491	1,33226412	0,02585235
8	1,96276059	1,48156119	0,02342116
8,5	2,04984795	1,64463238	0,0213947
9	2,10389125	1,78766907	0,01943488
10	2,10426778	1,98704305	0,0156196
11	2,14498732	2,22824958	0,01308697
12	2,15010651	2,43659571	0,01100652
13	2,13317018	2,61866752	0,0093118
14	2,09156355	2,76465652	0,00790724
15	2,03572122	2,88242767	0,00674998
16	1,96991809	2,97443402	0,00578992
17	1,90160783	3,05002727	0,00498991
18	1,83187054	3,11031768	0,0043193
19	1,76390252	3,16054061	0,00376318
20	1,69581218	3,19788122	0,00328432
21	1,63005735	3,22711504	0,00287699
22	1,56645653	3,24858002	0,00252604
23	1,5058203	3,26453919	0,00222658
25	1,39143088	3,27869081	0,00174344
28	1,24390698	3,28336562	0,0012345
30	1,15443272	3,26615698	0,00098392
32	1,07054139	3,23220364	0,00078899
34	0,98591496	3,16391896	0,00063474
36	0,90224505	3,0667417	0,00051155
38	0,82225099	2,95116891	0,00041238
40	0,74518839	2,81596888	0,00033411
43	0,64881299	2,63605194	0,00024979
45	0,57452851	2,44290918	0,00020123
50	0,45842843	2,16538172	0,00013056
53	0,36453705	1,82447093	9,3402E-05
56	0,29708291	1,57031464	6,9135E-05
60	0,22348071	1,26451107	4,6571E-05
63	0,17006812	1,00964022	3,2899E-05
66	0,13155101	0,81760475	2,3655E-05
71	0,08846103	0,59091233	1,4127E-05
75	0,05127769	0,36132427	7,6444E-06
80	0,03034172	0,2278161	4,092E-06
85	0,01575655	0,12553268	1,9568E-06
90	0,00738404	0,06219915	8,4728E-07
95	4,5175E-19	0	-1,1029E-22
100	0	0	0

D) LOTE 2 KR

Results					
Name	D10 Volume (μm)	D50 Volume (μm)	D90 Volume (μm)	Mean Size Volume (μm)	Span (μm)
J - KR2 1	4,63665051	18,7079871	43,6181715	22,7106654	2,08368334
J - KR2 2	4,70828226	18,6039045	43,2059449	22,5597356	2,06933242
J - KR2 3	4,66756637	18,3183004	42,4447983	22,1968848	2,0622673
Average	4,67083305	18,5433973	43,0896382	22,4890953	2,07176102

Distribution average			
Size distribution			
Particle diameter	Surface weighted	Volume weighted	Number weighted
[μm]	[%]	[%]	[%]
0,01	0	0	0
0,04	3,2296092	0,01202409	91,7325106
0,07	0,19846669	0,00129539	1,74289273
0,1	0,45013884	0,00419103	2,02555356
0,2	1,70123516	0,03165997	1,94671153
0,3	2,7614287	0,0770783	1,40815302
0,4	1,49801691	0,05573218	0,43329352
0,5	0,40226799	0,01866753	0,07849501
0,6	0,29905901	0,01663624	0,04163951
0,7	0,44319619	0,02878337	0,04464209
0,8	0,84878798	0,06307625	0,06359476
0,9	1,03679779	0,08669909	0,06102859
1	1,18177547	0,10981766	0,05615933
1,1	1,27124508	0,12995116	0,04987297
1,2	1,3627225	0,15197515	0,04486104
1,3	1,4352677	0,17341109	0,04021854
1,4	1,50516871	0,19585476	0,03632833
1,6	1,54731753	0,23011258	0,02855748
1,8	1,64541469	0,27530033	0,02396791
2	1,70052831	0,31614233	0,02005499
2,2	1,73799302	0,35541873	0,01693602
2,4	1,73812185	0,3877553	0,01423589
2,6	1,71370567	0,41415731	0,01196638
2,8	1,67767921	0,43662819	0,01010702
3	1,63371641	0,45554108	0,00858154
3,2	1,57838817	0,46943673	0,00729419
3,4	1,53774594	0,48592227	0,00629825
3,6	1,50134787	0,50231489	0,0054886
3,8	1,46688365	0,51805132	0,00481311
4	1,44278993	0,53635482	0,00427366
4,3	1,39769783	0,55855848	0,00358298
4,6	1,39006813	0,5942704	0,00311357
5	1,38558432	0,64387079	0,00262595
5,3	1,43027658	0,70453	0,00241117

5,6	1,46414476	0,76204421	0,00221051
6	1,49957489	0,83624891	0,00197101
6,5	1,5461832	0,9341068	0,00173092
7	1,6488521	1,07277341	0,00159099
7,5	1,76696046	1,23173269	0,00148513
8	1,88645001	1,40270476	0,00139339
8,5	2,02816638	1,6023238	0,00132726
9	2,1235221	1,77634587	0,00123953
10	2,17213335	2,01889982	0,00102702
11	2,26375831	2,31446661	0,0008846
12	2,30079519	2,56617897	0,00075546
13	2,3028571	2,78252387	0,00064422
14	2,26875211	2,95219043	0,00054719
15	2,21351715	3,08606216	0,00046499
16	2,14101292	3,18397862	0,00039524
17	2,06549993	3,26366536	0,00033772
18	1,98616787	3,32292884	0,00028963
19	1,90882128	3,37093632	0,00024982
20	1,82880335	3,39961151	0,000216
21	1,74999386	3,41576775	0,00018746
22	1,67365112	3,42231538	0,00016336
23	1,60007158	3,42058072	0,00014289
25	1,464252	3,40242866	0,00011068
28	1,29784716	3,37768225	7,8182E-05
30	1,19971376	3,34535452	6,2927E-05
32	1,11316713	3,31100824	5,1289E-05
34	1,02241993	3,23119638	4,171E-05
36	0,93135038	3,11656232	3,3875E-05
38	0,84336985	2,97897079	2,7518E-05
40	0,7576111	2,81693262	2,2298E-05
43	0,64953327	2,59624767	1,6533E-05
45	0,56439166	2,3608941	1,3108E-05
50	0,43497243	2,02173856	8,1751E-06
53	0,33135122	1,63256036	5,5366E-06
56	0,26029915	1,35511437	3,892E-06
60	0,18405055	1,02664411	2,3936E-06
63	0,13288469	0,77832343	1,5656E-06
66	0,09804809	0,6016442	1,0513E-06
71	0,06205309	0,40963199	5,7406E-07
75	0,03252583	0,22682701	2,6888E-07
80	0,01797048	0,13368342	1,303E-07
85	0,00850615	0,06723537	5,4507E-08
90	0,00355004	0,02971401	2,0213E-08
95	0	1,807E-18	0
100	0	0	0

REFERÊNCIAS

ABCP. **Fabricação do Cimento Portland.** Disponível em <<https://abcp.org.br/cimento/fabricacao>>. Acesso em: 5 set. 2023.

ARCELORMITTAL. **Uso dos recursos e altos índices de reciclagem, 2023.** Disponível em <<https://brasil.arcelormittal.com/sustentabilidade/diretrizes-desenvolvimento-sustentavel/recursos>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

ARCELORMITTAL. **Escória de Alto Forno, 2024.** Disponível em <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno>>. Acesso em: 03 out. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-4 – Cimento Portland – Análise química. Parte 4: Determinação do resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17086-6 – Cimento Portland – Análise química. Parte 6: Determinação a perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2023

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001.

BAosteel. **The BAT Steel Slag Treatment Technology, 2023.** Disponível em <<http://rd.baosteel.com/zypt/en/ability/see/abilityDetailsBSSF/2/4c2fba8dd97746f2a990c44e19857106>>. Acesso em: 05 dez. 2023.

BARÃO, C. D. **Fabricação de aço em forno básico a oxigênio - LD.** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 2008.

BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção - Vol. 1.* Disponível em: Minha Biblioteca, (6th edição). Grupo GEN, 2019.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no brasil**. 6. ed. Brasília: 2022.

BONIFÁCIO, Nathália Vanderlei. **Avaliação do uso de diferentes lotes de pó de despoieiramento do basculamento de escória KR como um material cimentício suplementar**. 2024. 72f. Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

DIAS, Alisson R. **Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de acaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto**. 2020. 13 f. Artigo (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

DIEGUEZ, Ana Carolina de Oliveira. **Utilização de escória de reator kambara na composição do cimento Portland**. 2018. 74 f. Dissertação (Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis) – Programa de pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

GCCA. **Societal demand for cement and concrete**. Disponível em <<https://gccassociation.org/concretefuture/societal-demand-for-cement-and-concrete>>. Acesso em: 5 set. 2023.

GOTO, Hudson, et al. *Materiais da construção*. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo A, 2018.

HEWLETT, Peter. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. Oxford: Elsevier, 2006.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. **Advances in alternative cementitious binders. Cement and Concrete Research**. 2011. 41: 1232–1243.

KIRMSE, Odair José. **Estudo do comportamento metalúrgico do “Reator Kambara” através de modelagem física**. 2006. 119 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia de materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

LOUREIRO, Mayara Santos. **Influência da escória de acaria Id em argamassas de alto desempenho**. 2023. 114 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2008.

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

NIPPONSTEEL. **Hot metal pre-treatment facility (Kanbara Reactor; KR)**, 2023. Disponível em

<https://www.eng.nipponsteel.com/english/whatwedo/steelplants/steelmaking/hot_metal_pretreatment_facility/>. Acesso em: 14 dez. 2023.

OLIVEIRA, Sábata Marla Reis Durães. **Desenvolvimento de metodologia para prever a eficiência de dessulfuração do ferro-gusa através da termodinâmica computacional.** 2015. 114 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

SIDDIQUE, Rafat. **Waste materials and by-products in concrete.** Berlin: Springer, 2008

SILVA, Celiane Mendes da; SANTOS JUNIOR, Gedson Lima dos; SILVA, Iara Kelly da, et al. **Concreto de alto desempenho: composição, produção e propriedades.** Ponta Grossa, PR, 2022.

WBCSD. **Cement technology roadmap shows how the path to achieve CO₂ reductions up to 24% by 2050.** Disponível em <<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso em: 5 set. 2023.

YILDIRIM, Irem Zeynep. PREZZI, Monica. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in Civil Engineering**, v. 2011, 2011.