

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

DANIEL GIACOMIN RAMPINELLI

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
AO CLÍNQUER PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

Vitória - ES

2023

DANIEL GIACOMIN RAMPINELLI

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
AO CLÍNQUER PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Geilma Lima Vieira

Vitória - ES

2023

DANIEL GIACOMIN RAMPINELLI

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO
AO CLÍNQUER PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND BRANCO**

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

COMISSÃO AVALIADORA

Prof^a. Dr^a. Geilma Lima Vieira
Orientadora (Presidente) - UFES

Prof^a. Dr^a. Rudiele Aparecida Schankoski
Examinadora

Eng. Luciana Paula Tessaro Morelo
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, por todo o acolhimento, o tempo e a paciência que tiveram comigo ao longo de todos esses anos ao longo de minha graduação.

Aos meus amigos do IFES que me acompanharam desde o início do nosso ensino médio, e a todos aqueles que conheci e criei laços de amizade na UFES, a convivência com vocês sempre foram um porto seguro quando eu precisava nos momentos difíceis.

Aos membros do Congres, muito obrigado pela confiança de vocês e espero poder estar sempre a disposição para ajudá-los tanto dentro das atividades do campus quanto fora (aliás o livro de presente ajudou bastante em alguns pontos do TCC!).

Não posso deixar de fora toda a equipe do LEMAC, Breno, Henrique, Luana e Márcio, que sempre me acolheram tanto na hora dos ensaios quanto fora seja, na hora de conversar entre os ensaios ou até mesmo nos almoços do RU.

Aos professores Geilma, Rudiele e Ronaldo, os meus mais sinceros agradecimentos por me engajar e motivar nas várias discussões em sala de aula, projetos e fora da rotina do campus, eu certamente não chegaria a este ponto se não fosse por vocês sempre estarem a disposição para compartilhar o conhecimento de vocês.

Agradecimentos também à Provale pela disponibilidade e doação do clínquer branco utilizado nessa pesquisa.

E por fim, obrigado a todos que, diretamente ou não, contribuíram com a minha caminhada até aqui.

RESUMO

RAMPINELLI, Daniel Giacomini. **Análise da Incorporação de Escória Granulada de Alto Forno ao Clínquer para a Produção de Cimento Portland Branco**. 2023. 87p. Projeto de Graduação em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2023. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Geilma Lima Vieira.

O cimento Portland branco (CPB) é uma variedade de aglomerante hidráulico aplicada em construções devido ao apelo estético que este material possui ora com sua coloração característica quando endurecido, ora quando aplicado junto à pigmentos. Entretanto, sua fabricação exige mudanças na linha convencional de produção, o que leva ao encarecimento e, por conseguinte, menor uso do material. Uma das possibilidades para melhor difundir esta variedade, está na incorporação de adições minerais, como a escória granulada de alto-forno (EGAF), já utilizada em outras variedades comercializadas em território nacional. Este fato, aliado a coloração clara do coproduto quando moído, propicia o estudo de sua incorporação ao CPB, frente às normativas que exigem requisitos a serem atendidos para comercialização do material. A metodologia utilizada neste trabalho é referente ao ensaio de matrizes cimentícias com a incorporação de 55% e 75% de EAF moída frente a todos os requisitos que a atual normativa vigente contempla, a ABNT NBR 16697:2018, além de uma caracterização prévia das matrizes criadas para este estudo. Observou-se que as misturas com teor de 55% de escória atendem a maioria dos requisitos para a sua viabilização técnica dentre as classes de resistência do CPB, porém para incorporação de 75%, nos resultados mecânicos, apenas a última classe de resistência não foi atendida. Os resultados encontrados demonstram que há uma possibilidade de uso da EGAF junto ao CPB, ao passo que a incorporação do coproduto corrobora para a menor a quantidade de clínquer utilizada para a produção do aglomerante.

Palavras-chave: Cimento Portland Branco; Escória de Alto Forno; Coproduto Siderúrgico.

ABSTRACT

RAMPINELLI, Daniel Giacomini. **Analysis of the Incorporation of Granulated Blast Furnace Slag to Clinker for the Production of White Portland Cement**. 2023. 87p. Projeto de Graduação em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2023. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Geilma Lima Vieira.

White Portland Cement (WPC) or White Ordinary Portland Cement (WOPC) is a variety of hydraulic binder applied in constructions due to the aesthetic appeal it has on its hardened state or when pigments are used together. However, its manufacture requires changes in the conventional production line, which leads to higher prices and, consequently, less use of this variety. One of the possibilities to better disseminate this variety is the incorporation as of a mineral addition, such as ground granulated blast furnace slag (GGBFS), already used in other varieties marketed in the national territory. This fact, combined with the light color of the by-product in powdered form, allows its study when it's mixed with WPC, in view of the regulations that require requirements to be met for the commercialization of the material. The methodology used in this work refers to the testing of cementitious blend with the incorporation of 55% and 75% of GGBFS in view of all the requirements that the current regulation, contemplated by ABNT NBR 16697: 2018, in addition to a previous characterization of the matrices created for this study. It was observed that the mixtures with a slag content of 55% meet most of the requirements for its technical viability among the WPC resistance classes, as for the 75% incorporated blend, the mechanical results showed that only the last resistance class could not be reached. The results showed that there is a potential use for the GGBFS alongside the WPC, while the incorporation of the by-product corroborates the lower amount of clinker used for the production of the binder.

Keywords: White Portland Cement; Blast Furnace Slag; Steelworks By-product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variação da cor do concreto para um mesmo teor de pigmento em diferentes cores de cimento, branco à esquerda e cinza ao centro e a direita.....	21
Figura 2.2 - À direita, prédio da Fundação Iberê Camargo, à esquerda, Ponte Irineu Bornhausen.....	21
Figura 2.3 - Church of 2000 “Dives in Misericordia”.....	23
Figura 2.4 - Esquema do funcionamento de um Alto Forno.....	30
Figura 2.5 - Escória Granulada de Alto Forno.....	31
Figura 3.1 - Fluxograma do Programa Experimental.....	43
Figura 3.2 - Sacos de Clínquer e Cimento após o recebimento (I), aspecto visual dos materiais (II e III)	46
Figura 3.3 - Material após recebimento (I) e aspecto visual da escória granulada moída (II).....	47
Figura 3.4 - Moinho utilizado para confecção das matrizes compostas	48
Figura 3.5 - Aspecto visual das matrizes EGAF-M 55% (I) e EGAF-M 75% (II)	49
Figura 3.6 - Aparelhagem para os ensaios relativos à NBR 16372:2015 (I) e à NBR 16605:2017 (II)	50
Figura 3.7 - Aparelhagem para a massa unitária da NBR 16372:2015 (I) e amostra do ensaio (II)	51
Figura 3.8 - Aparelhagem para os ensaios relativos ao resíduo na peneira 75µm (I), tempo de início/final de pega (II), expansibilidade a quente/frio (III) e banho térmico para o ensaio (IV).....	52
Figura 3.9 - Aspecto visual da pasta de cimento na argamassadeira (I) e posterior ensaio no aparelho de Vicat com a sonda de Tetmajer (II)	53
Figura 3.10 - Vidrarias para o ensaio de resíduo insolúvel/trióxido de enxofre (I), etapa inicial de ataque ácido às amostras (II), verificação final da presença de cloretos no ensaio de RI (III) e amostras de RI e PF após processo de calcinação..	54
Figura 3.11 - Materiais separados anterior ao preparo dos CPs (I), CPs finalizados (II), processo de cura nas primeiras 24h (III) e submersos (IV).....	55
Figura 3.12 - Recipiente utilizado para densidade de massa (I), leitura da massa após preenchimento (II) e amostra de argamassa após a aplicação de golpes pelo flow table	56
Figura 3.13 - Representação do Espaço de Cor L*a*b*/CIELAB	57

Figura 3.14 – Exemplo de imagem para análise do ensaio.....	58
Figura 3.15 – Interface da página Adobe Colors e método de análise	58
Figura 4.1 - Fotos utilizadas para a análise colorimétrica EGAF-M 0% (I), EGAF-M 55% (II) e EGAF-M 75% (III)	66
Figura 4.2 - Seção transversal dos corpos de prova, da esquerda para direita: 0% (I), 55% (II) e 75% (III)	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Média dos índices de consistência	69
Gráfico 4.2 - Evolução das massas específicas no estado endurecido das matrizes	71
Gráfico 4.3 - Desenvolvimento da resistência à compressão axial das matrizes cimentícias	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Produção das variedades de cimento Portland por Unidades da Federação em 2020	15
Tabela 2.1 - Limites de composição e requisitos químicos, segundo classe.....	19
Tabela 2.2 - Requisitos físicos e mecânicos, segundo classe.....	20
Tabela 2.3 - Comparativo entre as fases mineralógicas de um cimento cinza com um branco.	25
Tabela 2.4 - Composição de Bogue realizada nos estudos de Kirchheim (2005).	26
Tabela 2.5 - Composição química da escória granulada de alto forno.....	31
Tabela 2.6 - Composição química de escórias utilizadas em pesquisas.....	32
Tabela 2.7 - Características referentes aos estudos de CPB com EAF.	38
Tabela 3.1 - Resultado da caracterização preliminar	51
Tabela 3.2 - Resultado da caracterização preliminar referente à água de pasta de consistência normal.....	53
Tabela 4.1 - Valores de resíduo insolúvel para as matrizes	60
Tabela 4.2 - Valores de perda ao fogo para as matrizes.....	61
Tabela 4.3 - Valores de SO ₃ para as matrizes.	62
Tabela 4.4 - Valores em % de material retido médio para as matrizes.	63
Tabela 4.5 - Valores em minutos dos tempos de início e fim de pega das matrizes.	63
Tabela 4.6 - Valores em mm de expansibilidade das matrizes.	65
Tabela 4.7 - Coordenadas L*a*b* das amostras	66
Tabela 4.8 – Densidade de massa das misturas realizadas.	68
Tabela 4.9 - Índice de consistência das misturas realizadas.....	69
Tabela 4.10 - Massa específica no estado endurecido das matrizes	71
Tabela 4.11 - Resistência à compressão axial da matriz EGAF-M 0% e seus respectivos DRM	72
Tabela 4.12 - Resistência à compressão axial das matrizes EGAF-M 55% e seus respectivos DRM	72
Tabela 4.13 - Resistência à compressão axial das matrizes EGAF-M 75% e seus respectivos DRM	73
Tabela 4.14 - Comparação das resistências encontradas frente à norma 16697:2018	75
Tabela 4.15 - Comparativo geral das matrizes com a NBR 16697:2018.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Estudos desenvolvidos sobre a incorporação de diferentes tipos de escória no Departamento de Engenharia Civil da UFES.....	17
Quadro 3.1 - Divisão de etapas do programa experimental	41
Quadro 3.2 - Listagem dos ensaios contemplados pelo programa experimental	42
Quadro 3.3 - Divisão e classificação das variáveis de estudo.....	44
Quadro 3.4 - Fatores constantes ao longo das etapas.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3	-	Óxido de Alumínio
CaO	-	Óxido de Cálcio
Ca(OH)_2	-	Hidróxido de Cálcio
C_3A	-	Aluminato Tricálcico
C_4AF	-	Ferro-aluminato Tetracálcico
C_2S	-	Silicato Dicálcico
C_3S	-	Silicato Tricálcico
C-S-H	-	Silicato de Cálcio Hidratado
CO_2	-	Dióxido de Carbono / Gás Carbônico
CP	-	Cimento Portland
CPB	-	Cimento Portland Branco
EAF/EGAF	-	Escória de Alto-Forno / Escória Granulada de Alto-Forno
Fe_2O_3	-	Óxido de Férrio
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	-	International Energy Agency
UFES	-	Universidade Federal do Espírito Santo
UFMS	-	Universidade Federal de Santa Maria
MgO	-	Óxido de Magnésio
PF	-	Perda ao Fogo
RI	-	Resíduo Insolúvel
SiO_2	-	Dióxido de Silício
SO_3	-	Trióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	18
1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	Cimento Portland Branco	19
2.1.1	Aplicação do Cimento Portland Branco	20
2.1.2	Produção do cimento Portland branco.....	23
2.1.3	Composição química do cimento Portland branco.....	25
2.1.4	Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland branco.....	27
2.2	Escória Granulada de Alto Forno	30
2.2.1	Produção da Escória de Alto Forno (EAF).....	30
2.2.2	Composição química da EAFG.....	31
2.2.3	Aplicação da EAFG na Construção Civil	34
2.2.4	Estudos com a EAFG e CPB	35
3	METODOLOGIA DO ESTUDO	41
3.1	Programa Experimental.....	41
3.2	Materiais.....	46
3.2.1	Cimento Portland Branco.....	46
3.2.2	Clínquer de Cimento Portland Branco	46
3.2.3	Escória Granulada de Alto-Forno	46
3.2.4	Matrizes Compostas	47
3.2.5	Água	49
3.2.6	Agregado miúdo	49
3.3	Métodos	50
3.3.1	Caracterização Preliminar	50
3.3.2	Caracterização Física	52
3.3.3	Caracterização Química	54
3.3.4	Caracterização Mecânica	55
3.3.5	Análise Colorimétrica	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	Requisitos Químicos	60

4.1.1	Resíduo Insolúvel (RI)	60
4.1.2	Perda ao Fogo (PF)	61
4.1.3	Trióxido de Enxofre/Anidrido Sulfúrico (SO ₃).....	62
4.2	Requisitos Físicos	63
4.2.1	Finura (%) - Resíduo na Peneira 45 µm	63
4.2.2	Tempos de início e final de pega	63
4.2.3	Expansibilidade a quente.....	65
4.2.4	Brancura	66
4.3	Requisitos Mecânicos e Caracterização no Estado Fresco	68
4.3.1	Densidade de massa (massa específica no estado fresco).....	68
4.3.2	Índice de Consistência (Flow-Table).....	69
4.3.3	Resistência à compressão mecânica	70
4.4	Avaliação Frente À Norma ABNT NBR 16697:2018	76
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	80
6	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor da construção civil, proporcionou um amadurecimento quanto ao uso do cimento Portland. O cenário mundial atual não apenas demanda uma maior quantidade de concreto, mas também que este material tenha características como durabilidade, estética e sustentabilidade. Os concretos especiais oferecem uma oportunidade para adequar os empreendimentos às especificidades que possam surgir de sua demanda. As estruturas em concreto de cimento Portland branco (CPB), por exemplo, possibilitam um diferencial estético, não apenas em função de sua característica cor branca, mas também de ser uma excelente base para pigmentação.

A seleção de materiais e a mudança da linha de produção garantem a coloração branca do produto, porém impactam diretamente no preço de venda do CPB. Além da fabricação, a etapa de concretagem também acrescenta no custo de produção das estruturas em concreto de cimento branco, ao considerar aspectos como o revestimento das fôrmas e a mão de obra especializada para garantir a qualidade da peça final. Apesar do maior custo inicial, por se tratar de um concreto aparente, os custos de acabamentos e manutenção são reduzidos e o investimento inicial será diluído ao longo da vida útil da estrutura (KIRCHHEIM, 2005).

A obtenção da cor branca é em função das modificações ocorridas ao longo da cadeia produtiva do CPB em comparação às classes convencionais. A principal mudança ocorre com a redução do teor de ferro (na forma de Fe_2O_3) em suas matérias-primas para uma concentração menor que 0,5% em relação à massa total do clínquer. Como resultado, ocorre o aumento da temperatura do processo de calcinação da mistura crua, uma vez que o composto atua como fundente. O controle sobre a presença de ferro também ocorre com a moagem do material, a qual procura-se utilizar esferas feitas ou revestidas de cerâmica. Outro aspecto de controle da cor recai sobre a escolha do combustível utilizado no forno, uma vez que o material particulado em decorrência da combustão possa vir a contaminar a coloração do clínquer (KIRCHHEIM, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Apesar das alterações na cadeia produtiva, as etapas de fabricação são similares às observadas em cimentos das classes mais convencionais, e de maneira análoga, sujeita aos mesmos impactos ambientais oriundos de sua produção. A Agência

Internacional de energia (IEA - International Energy Agency), estima que a produção de cimento em 2020 foi de 4,3 bilhões de toneladas, com um índice de emissão de CO₂ de 0,59 toneladas do gás para cada tonelada de cimento produzido.

Algumas soluções propostas para a mitigação das emissões de CO₂ envolvem tecnologias como sequestro de carbono, com o intuito de aprisionar parte dos gases no próprio material. Scrivener *et al.* (2018) discorrem que embora este tipo de tecnologia ofereça uma possibilidade para redução dos gases, ao considerar o panorama de produção de cimento em países em desenvolvimento, esta medida se torna inviável economicamente e métodos alternativos como o uso eficiente do clínquer e sua substituição parcial pelos materiais cimentícios suplementares, podem auxiliar as metas de redução das emissões.

A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares já é observada no Brasil por meio de 3 classes normatizadas: a família do cimento Portland tipo II (CP II-E, CP-II Z e CP-II F), o cimento Portland tipo III e o tipo IV (ABNT NBR 16697:2018). Ao considerar o panorama nacional, o Anuário Estatístico do Brasil (IBGE, 2021) aponta em seu relatório que, em 2020, a maior produção observada foi do CP-II, seguida das respectivas classes, CP-V, CP-IV e CP-III. A tabela 1.1 apresenta os dados de produção disponibilizados no relatório.

Tabela 1.1 - Produção das variedades de cimento Portland por Unidades da Federação em 2020

Produção de cimento Portland (1000 t), segundo as Unidades da Federação - 2020							
Grandes Regiões	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	CPB	Total
Brasil	4	33862	4445	5009	9454	-	58955
Norte	-	1696	-	546	-	-	2242
Nordeste	4	9030	384	802	1227	-	11447
Centro-oeste	-	4462	-	5	429	-	4896
Sudeste	-	12943	4061	1319	5771	-	24093
Sul	-	5731	-	2337	2027	-	10095

(Fonte: IBGE adaptado, 2021)

O uso da escória de alto-forno na produção de cimentos se apresenta como uma solução benéfica tanto para a siderúrgica que o descarta, ao passo que se encontra

um setor para absorver este resíduo, quanto para a cimenteira, que ao incorporar a escória, permite uma maior diluição da massa de clínquer em relação a uma massa final de cimento produzido e redução do gasto energético para produção do insumo. Embora o ganho ambiental seja perceptível na redução da massa de clínquer e a diminuição do descarte em aterros industriais, salienta-se que a etapa de transporte pode contrabalancear o ganho global, ao levar em conta as emissões geradas pelos meios de transportes utilizados (JOHN E AGOPYAN, 2000; NEHRING et al., 2020).

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) possui um histórico de pesquisas e estudos na forma de projetos de graduação, iniciações científicas, e dissertações a respeito da incorporação dos coprodutos siderúrgicos em diferentes setores da construção civil. O quadro 1 apresenta uma compilação dos estudos, realizada por Ferrari e Silva (2021), a respeito das iniciativas acadêmicas desenvolvidas na UFES.

Quadro 1.1 - Estudos desenvolvidos sobre a incorporação de diferentes tipos de escória no Departamento de Engenharia Civil da UFES

Incorporação em	Tipo de escória	Trabalhos
Concretos	EAF	Avelar (2008); Bourguignon (2004); Coelho (2016); Matos, <i>et al.</i> (2020); Mello (2015); Moraes (2008);
	EAFRA	Matos, <i>et al.</i> (2020); Oliveira e Medina (2019);
	PEA	Coitinho (2019)
	LD	Avelar (2008);
Estabilização Química de Solos de Baixa Consistência	EAF	Da Cunha (2020);
	KR	Da Cunha (2020); Moratti e Scotá (2016); Ramos (2018); Tessari e Cobe (2015);
	LD	Da Cunha (2020); Pimenta (2019);
Bases e Sub-bases de Pavimentos	KR	Andrade (2018); Oliveira e Daniel (2018); Nepomuceno (2019); Oliveira (2018); Furieri (2019)
	LD	Azeredo (2018); Canal, <i>et al.</i> (2020); Oliveira (2006);
	FEA	Canal, <i>et al.</i> (2020);
Revestimento Asfáltico	EAF	Costa (2020); Do Nascimento (2020);
	EAFRA	Moura (2020);
	LD	Azeredo (2018); Costa (2020); Do Nascimento (2020); Izoton (2020); Moura (2020); Schumacher (2018);
	FEA	Cosme (2015); Fonseca (2016); Gottardi (2015);
Tijolos Solo-Cimento	EAF	Da Silva (2005); Souza Filho (2005);
	EAFRA	Souza Filho (2005)

Fonte: Ferrari e Silva (2021)

Apesar dos estudos realizados para viabilizar a incorporação em outros setores para além de concretos e argamassas, a principal destinação do resíduo ainda é voltada para a fabricação de cimentos Portland tipo II-E e III (FERRARI E SILVA, 2021).

A incorporação deste coproduto já foi estudada em cimentos brancos, aos quais se destacam os estudos realizados pelos autores Barin (2008), com a análise da carbonatação e absorção capilar; Dellinghausen (2009) com a análise de retração total e penetração de cloretos; Lübeck (2008) com a análise de resistividade elétrica, Siqueira (2008) com a análise de penetração de cloretos com a aplicação de ativadores químicos e Veiga (2011) com a análise de ataques por sulfato, também com a aplicação de ativadores.

Embora estudos comprovem um desempenho mecânico similar, comparado às variantes de coloração cinza e a possibilidade de redução de gastos com etapas de acabamento, seja o concreto pigmentado ou não, o fator de custo inicial, ao considerar não apenas o material, mas também a mão-de-obra especializada, ainda pesa na decisão da escolha pelo uso do cimento Portland branco em função de outra classe convencional (KIRCHHEIM, 2005; HAMAD, 1995; BARBOSA *et al.*, 2005)

A fim de averiguar a viabilidade técnica da adição de escória de alto forno granulada ao clínquer de cimento Portland branco, como forma de redução de custos de fabricação e mitigação das emissões do processo produtivo, este trabalho se propõe em analisar os comportamentos físicos, químicos e mecânicos da incorporação do resíduo em diferentes teores ao clínquer, com base nas normativas de controle de qualidade existentes.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do cimento Portland branco com incorporação da escória de alto-forno granulada ao clínquer branco, em comparação aos cimentos comercializados no mercado com a designação de CPB.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento mecânico das misturas produzidas com teores de 0% (controle), 55% e 75% da massa de clínquer em escória em comparação ao CPB;
- Avaliar a brancura da mistura de clínquer e diferentes teores de escória conforme a ABNT NBR NM 3 Cimento Portland Branco - Determinação da Brancura;
- Caracterização da mistura e verificação de sua correspondência com os requisitos gerais, os requisitos específicos e as referências normativas conforme a ABNT NBR 16697:2018.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland Branco

O cimento Portland Branco (CPB) é definido pela ABNT NBR 16697:2018 Cimento Portland - Requisitos, como: “Cimento Portland constituído de clínquer Portland branco e cujas adições (sulfato de cálcio ou outras) não geram alterações em sua coloração além dos limites estabelecidos nesta Norma”. Os limites em questão são referenciados pelo anexo “A” da mesma norma, a qual aponta um limite mínimo de 78% de brancura para cimentos com fins estruturais e 82% para fins não estruturais.

A norma também apresenta as demais especificações físicas, químicas e mecânicas as quais o CPB deverá atender para sua utilização, conforme demonstrado nas tabelas 2.1 e 2.2

Tabela 2.1 - Limites de composição e requisitos químicos, segundo classe.

		CPB Estrutural (25, 32 ou 40 MPa)	CPB Não- estrutural
Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	75-100	74-40
	Material Carbonático	26-50	26-50
Requisitos químicos (%)	Resíduo Insolúvel (RI)	≤ 3,5	≤ 7,0
	Perda ao Fogo (PF)	≤ 12,0	≤ 27,0
	Óxido de Magnésio (MgO)	≤ 6,5	≤ 10,0
	Trióxido de Enxofre (SO ₃)	≤ 4,5	≤ 4,5
	Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 12,0	≤ 27,0

(Fonte: ABNT NBR 16697 adaptado, 2018)

Tabela 2.2 - Requisitos físicos e mecânicos, segundo classe.

		CPB 25	CPB 32	CPB 40	CPB Não-estrutural
Finura (%) - resíduo na peneira 75 µm		≤ 12,0			
Tempo de Pega (min)	Início	≤ 60			
	Fim	≤ 600			
Expansibilidade (mm)	a quente	≤ 5			
Índice de Brancura		≥ 78			≥ 82
Resistência mecânica (MPa)	3 dias	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0	≥ 5,0
	7 dias	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0	≥ 7,0
	28 dias	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0	≥ 10,0

(Fonte: ABNT NBR 16697 adaptado, 2018)

2.1.1 Aplicação do Cimento Portland Branco

A coloração branca do CPB o torna um atrativo para construções de concreto aparente. A brancura do material também traz uma outra característica: a maior reflexão luminosa (albedo), e por conseguinte uma menor absorção de radiação solar. Levinson e Akbari (2002) realizaram um estudo comparativo da composição de diferentes pavimentos de concreto, ao qual apontaram um maior albedo das superfícies compostas com cimento branco.

Nero e Nunes (2000) apontam que para a obtenção de uma peça homogênea e com bom acabamento, todas as etapas de execução devem ser cautelosamente avaliadas, uma vez que a própria fase de acabamento está diretamente ligada a fase de levantamento das estruturas, e que quaisquer falhas serão evidenciadas pela cor mais clara do material. Os autores também apontam que este maior controle de qualidade, favorece as aplicações deste tipo de concreto em uma aplicação pré-moldada, como painéis e elementos estruturais como vigas e pilares.

A coloração clara também permite maior liberdade quanto à pigmentação do concreto. Em bases cimentícias convencionais, o uso de pigmentos associados a tonalidades mais claras, como laranjas, amarelos, azuis e verdes, podem ser afetados pela base acinzentada do material, o que ocasiona em cores mais apagadas e/ou escuras comparadas a sua utilização em uma base branca (G&C Colors s.a., 2013).

Figura 2.1 - Variação da cor do concreto para um mesmo teor de pigmento em diferentes cores de cimento, branco à esquerda e cinza ao centro e a direita



Fonte: G&C Colors s.a., 2013.

Destaca-se também a aplicação não estrutural para o CPB, em locais como tampos para bancadas, telhas, painéis decorativos e blocos para pavimentação. De modo análogo à aplicação estrutural, pode-se também utilizar a pigmentação para modificar a estética das superfícies acabadas (KIRCHHEIM *et al.*; TUTIKIAN, 2022).

Em termos de exemplos de aplicação, as construções que fazem uso do cimento branco são marcadas também pelas suas estruturas que fogem ao convencional, seja pela aplicação de elementos arquitetônicos como arcos, grandes vãos ou até mesmo pela escala do projeto em que são aplicadas. No Brasil, duas obras ganharam destaque pela sua utilização do concreto com CPB, a figura 2.2 apresenta as estruturas do prédio da Fundação Iberê Camargo, localizado na cidade de Porto Alegre - RS e a Ponte Irineu Bornhausen, localizada na cidade de Brusque - SC.

Figura 2.2 - À direita, prédio da Fundação Iberê Camargo, à esquerda, Ponte Irineu Bornhausen.



Fontes: Helm via ArchDaily, 2011 e Brusque Memória, 2004.

O prédio da Fundação Iberê Camargo em particular, teve o seu processo de desenvolvimento do traço e controle tecnológico do concreto realizados por um grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em 2004. Em seu trabalho, Silva Filho *et al.* (2004) realizaram em um primeiro momento, estudos para verificarem aspectos mecânicos, de durabilidade e de cromaticidade, a fim de não apenas garantirem a correta execução e aplicação do concreto na estrutura, mas também os aspectos econômicos relacionados ao uso do material. Em um segundo estudo, Silva Filho (2004, apud Tutikian e Dal Molin, 2004), analisou o uso do cimento branco junto à tecnologia de concreto autoadensável para execução das estruturas do prédio da Fundação Iberê Camargo, com a sua posterior aplicação em obra.

Segundo o anuário estatístico do IBGE (2021), o consumo de CPB é baixo quando comparado a outras variedades, além de apontar que não há mais produção de cimento branco em território nacional, o que acarreta a importação do material caso queira utilizá-lo em alguma construção. Aliada a este fato, dificuldades de se obter um rígido controle de qualidade *in loco* e mão de obra especializada para manuseio deste material, corroboram para o aumento do custo final da concretagem (NERO E NUNES, 2000).

Silva Filho (2004) ressalta que apesar dos custos iniciais altos, relativos ao uso do aglomerante, da seleção refinada de materiais complementares, que fogem às situações de obra convencionais, além de técnicas construtivas diferenciadas, quando esses procedimentos são seguidos corretamente, podem resultar em uma estrutura final com maior durabilidade. Além disso, a tecnologia de concreto exposto dispensa etapas de acabamento. A melhora da durabilidade e eliminação de etapas, corroboram na redução de preço, além de diluírem o custo inicial da obra ao longo da vida útil da construção (KIRCHHEIM, 2003).

O CPB também é destaque na tecnologia de concretos fotocatalíticos. De acordo com Guo e Poon (2018), a coloração branca do material corrobora com a fotocatalise, reação química, que na presença de luz solar, realiza a decomposição de substâncias e outros materiais e as transforma em outros compostos menos nocivos. Em casos em que se deseja obter uma superfície branca, o dióxido de titânio, material empregado para fornecer a função de fotocatalise, auxilia com a brancura, uma vez que ele também pode ser utilizado como pigmento de coloração branca (G&C Colors

s.a., 2013). Um dos exemplos de aplicação de concreto branco aparente com características fotocatalíticas, está na igreja *Dives in Misericordia*, localizada na cidade de Roma, Itália (CASSAR et al., 2003).

Figura 2.3 - Church of 2000 “Dives in Misericordia”.



Fonte: ArchDaily, 2009.

Outra utilização, fora da área da construção civil, está na odontologia, onde o cimento Portland branco pode ser encontrado em estudos comparativos de seus efeitos com outros materiais já consolidados na área, como o Agregado Trióxido Mineral (ou MTA), utilizado em reparos durante procedimentos odontológicos (CARMONA et al., 2009).

2.1.2 Produção do cimento Portland branco

A coloração que dá o nome para esta variedade de cimento Portland, é obtida por meio de modificações nos processos de coleta de matéria-prima e de fabricação dos cimentos convencionais.

Para a fabricação de um cimento, utilizam-se matérias-primas que possuam em sua composição os principais óxidos que compõem o clínquer, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (BATTAGIN; TUTIKIAN, 2022). Entretanto, na fabricação do CPB, utilizam-se componentes com baixo teor de Fe_2O_3 (KIRCHHEIM et al., 2005), uma vez que este material é responsável pela coloração acinzentada característica dos cimentos convencionais. Além desta restrição, procura-se também reduzir o teor de outros óxidos, como o MnO_2 , Cr_2O_3 e TiO_2 (BLANCO-VARELA, 1997, apud KIRCHHEIM et al., 2005).

Além dos componentes do clínquer, materiais como gipsita e adições carbonáticas que vão compor o produto, também devem ser previamente selecionados quanto ao

aspecto de cor, para melhor compatibilidade entre os componentes do cimento (MORESOVÁ E ŠKVÁRA, 2001).

O processo de sinterização do clínquer é similar às variedades acinzentadas, porém a baixa concentração de Fe_2O_3 , aumenta o ponto de fusão dos materiais, o que passa a requerer um maior consumo energético para a produção do CPB (KIRCHHEIM et al., 2005). A alta temperatura também fornece o ambiente ideal para a redução dos óxidos oriundos de ferro, cromo e manganês, uma vez que ao passar para um nível de oxidação menor, os óxidos gerados pelos íons reduzidos apresentam menor grau de absorção de luz, o que intensifica a brancura final do cimento (MORESOVÁ E ŠKVÁRA, 2001).

O processo de resfriamento abrupto, realizado para garantia da reatividade do clínquer, também ocorre para a fabricação do CPB, porém atenta-se para a presença de oxigênio ao longo do processo de resfriamento, pois na presença deste elemento, pode ocorrer a contaminação da cor do material, através da formação dos óxidos mencionados no parágrafo anterior. De acordo com Moresová e Škvará (2001), um ambiente de resfriamento pobre em oxigênio e rico em monóxido de carbono (CO), garante a formação do clínquer sem a formação de óxidos que possam vir a pigmentar o CPB.

O resfriamento também conta com uma etapa de “branqueamento”, que é a pulverização de água sobre o clínquer para redução da temperatura do material, o que ocasiona a estabilização de alguns espécimes químicos que são formados pela sinterização anterior do material, além de partículas com maior grau de reflexão. Moresová e Škvará (2001), porém, atentam que o maior grau de incorporação de água no clínquer leva a uma hidratação prematura do material, o que acarreta em menor potencial de resistência mecânica.

Além do controle da formação dos espécimes químicos do clínquer, outros aspectos importantes devem ser modificados para garantir a brancura. As esferas de aço utilizadas durante a etapa de moagem das matérias-primas, podem vir a contaminar o material com o desgaste que elas sofrem durante o impacto da moagem, ao passo que podem ser substituídas por esferas revestidas de cerâmica, ou compostas por ligas metálicas alternativas (KIRCHHEIM, 2005 e NEVILLE, 1997 apud DELLINGHAUSEN, 2009). Outro ponto importante levantado pelos autores, está no

combustível utilizado para sinterização, uma vez que os produtos da combustão geram materiais particulados que possam levar a contaminação da cor do material.

Ressalta-se aqui, que a falta de fábricas de CPB em território nacional, dificulta a obtenção da informação e estudos sobre os processos produtivos do material, uma vez que pesquisas voltadas à produção do insumo, ficam restritas ao contexto internacional e, por conseguinte, difícil acesso em casos de pesquisas divulgadas em periódicos mais regionais.

2.1.3 Composição química do cimento Portland branco

Após o processo de fabricação do cimento Portland, o produto em seu estado final apresenta 4 fases mineralógicas principais, o grupo de silicatos cálcicos compostos pela alita e belita, e o grupo de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, além de outros minerais em menor quantidade (BATTAGIN; TUTIKIAN, 2022).

Uma vez que o processo produtivo do CPB envolve a restrição de matérias-primas com elevado teor de ferro, ocorre uma alteração na concentração desses compostos mineralógicos no cimento. Hamad (1995) comparou um cimento branco com um cimento cinza, ambos de classificação tipo 1, conforme a ASTM C150. A Tabela 2.3 mostra os resultados da comparação realizada pelo autor.

Tabela 2.3 - Comparativo entre as fases mineralógicas de um cimento cinza com um branco.

Composto	Quantidade do composto (% em massa)	
	Cimento Portland Cinza	Cimento Portland Branco
C₃S	52,2	48,5
C₂S	18,8	30,5
C₃A	10,8	13,4
C₄AF	9,1	0,8

(Fonte: Hamad adaptado, 1995)

Observa-se que o CPB analisado apresentou valores próximos de C_3S e maiores valores de C_2S e C_3A em comparação a variedade cinza. Essas duas fases são responsáveis, respectivamente, pelo desenvolvimento de resistência em idades avançadas e endurecimento do cimento enquanto fresco. Portanto, pode-se inferir que há um maior potencial de resistência em maiores idades para o CPB quando comparado ao cimento cinza analisado, além de um menor tempo de pega, em função da maior concentração de C_3A (HAMAD, 1995).

Apesar de não possuir um comportamento expressivo nas reações de hidratação, nota-se também o baixo teor de C_4AF em relação à variedade cinza, justificada pela seleção de materiais com baixo teor de ferro. Gobbo (2003) aponta em seu estudo que esta fase em particular é responsável pela coloração acinzentada, justamente por conta do ferro em sua composição. Ressalta-se aqui, que apesar de haver um controle na presença de materiais com ferro em sua composição, não há nenhum limite estipulado em específico de Fe_2O_3 para o CPB, embora valores limites como 0,5% em relação à massa total de clínquer, estejam presentes na literatura (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Kirchheim (2003) realizou um comparativo entre as fases mineralógicas presentes em relação a outros trabalhos que também tiveram o CPB como material de estudo,

Tabela 2.4 - Composição de Bogue realizada nos estudos de Kirchheim (2005).

Fonte:	Composição de Bogue (%)			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Bensted (1983)	67,1	12,5	8,5	1,4
Singh e Singh (1989)	41,7	19,8	12,5	1,4
Dunster et al (1993)	60,0	24,0	10,6	0,7
Stürmer et al (1994)	71,6	6,8	10,6	0,7
Hamad (1995)	48,5	30,7	13,5	0,8
Heren e Ölmez (1996)	51,2	27,5	12,1	0,9
Richardson e Groves (1997)	65,0	22,0	4,0	1,0
Stephan et al (1999)	54,0	0,4	7,0	0,6
PCA (1999a)	60,0	19,0	11,0	1,0

Werner et al (2000)	72,0	9,0	12,0	0,6
Levinson e Akbari (2001)	68,0	14,0	13,0	0,6
Sora et al (2001)	50,0	9,7	7,0	0,4
Rothstein et al (2002)	72,0	17,0	5,0	1,0
Hansen (2002)	61,7	24,9	4,5	0,9
Chandra e Björnström (2002)	63,0	25,0	4,0	1,0

(Fonte: Kirchheim adaptado, 2005)

Em relação aos requisitos químicos definidos pela NBR 16697, sobressaem os quantitativos referentes aos óxidos de magnésio (MgO) e trióxidos de enxofre (SO₃). A limitação do MgO está relacionada à formação de produtos de caráter expansivo após a sua hidratação, enquanto o SO₃ está relacionado à redução do tempo de pega, além de favorecer a formação de C₂S, o que causa uma menor resistência do cimento nas primeiras idades (PECCHIO, 2013).

Outros dois ensaios também constituem os requisitos químicos principais para a conformidade de um cimento frente à norma: o ensaio de perda ao fogo, associado à possível hidratação e carbonatação anterior ao uso; e o ensaio de resíduo insolúvel, referente ao processo de queima e resfriamento do cimento durante a sua produção. Além disso, em conjunto com o trióxido de enxofre, esses valores auxiliam a verificar se os teores de adições foram atendidos (BATTAGIN; TUTIKIAN, 2022).

2.1.4 Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland branco

Entre as propriedades físicas e mecânicas do CPB, neste trabalho, o enfoque será sobre os requisitos contemplados pela NBR 16697:2018. Os requisitos físicos são: Finura do material, definido pelo material residual na peneira de abertura 75 µm, os tempos de início e final de pega, expansibilidade a quente e a brancura. Já em relação às propriedades mecânicas, o foco será orientado apenas para a resistência à compressão axial.

O requisito de finura está associado à correta moagem dos componentes do cimento ao longo do seu processo de fabricação e está diretamente relacionada não apenas com a distribuição granulométrica do material, mas também com o comportamento do estado fresco e o desempenho mecânico do cimento, quando endurecido

(BATTAGIN; TUTIKIAN, 2022). No tocante ao CPB, o processo de moagem influi sobre a brancura final do cimento, uma vez que finuras mais elevadas intensificam a coloração branca (NEVILLE, 1995 apud BARIN, 2008).

Conforme apontado no tópico de composição química do cimento, o CPB possui em sua composição um maior teor de C_3A . Esta fase possui maior reatividade e é representativa do processo de endurecimento do cimento. Quando associada à elevada finura que este cimento possui e a maior presença de C_3S , afeta os tempos de início e fim de pega do material, de modo a apresentar uma tendência a redução dos mesmos (HAMAD, 1995; PASSUELO, 2004).

Em relação à resistência mecânica do CPB, destaca-se a pesquisa realizada por Hamad (1995), com um dos objetivos de desmistificar a noção na época do estudo, que o cimento Portland branco possuía um menor desempenho mecânico comparada às variedades cinzas dentro de uma mesma classe. Como resultado, Hamad encontrou resistências mecânicas até superiores ao cimento cinza utilizado em sua pesquisa.

Neste mesmo estudo, Hamad (1995) se utiliza da normativa ASTM C150 para justificar a escolha dos cimentos. Em sua pesquisa, os cimentos cinzas e brancos foram escolhidos conforme a classificação *Type-I*, que compreende os cimentos cujas características especiais não se encaixam em nenhuma outra classe. O autor justifica que a comparação não foi realizada com cimentos cinzas da classe *Type-III*, que engloba cimentos de alta resistência inicial, pois a finura dessa variedade compara a branca era mais elevada.

Apesar dessa ressalva, diversos estudos comparativos no Brasil (BARIN, 2008; KIRCHHEIM, 2003; VEIGA, 2011), utilizam o CPV, que é a classe mais próxima da *Type-III*, para comparação com o CPB. No estudo de Kirchheim (2003), apesar de comparativamente o CPV apresentar maior resistência em relação ao CPB, algumas variedades apresentaram comportamento mecânico próximo ao CPB nas idades de 7 e 28 dias. LÜBECK (2008) ao comparar a referência de cimento cinza com a referência de cimento branco, encontrou valores de resistências maiores para a variedade mais clara nas idades de 7, 28 e 91 dias.

Os ensaios de expansibilidade estão relacionados à constância de volume apresentado pelo cimento após a sua hidratação (BATTAGIN; TUTIKIAN, 2022). A expansão excessiva pode ser causada pela presença de cal livre após a fabricação do cimento, e sua posterior transformação em Ca(OH)_2 pode ocasionar em uma expansão de até 95% de seu volume original (HAMAD, 1995; PECCHIO, 2013).

O requisito de brancura é uma das características cruciais para que um cimento seja realmente considerado como branco. A NBR 16697, especifica teores de 78% e 82% para, respectivamente, os cimentos de uso estrutural e não-estrutural. O método de avaliação é especificado pela ABNT NM 3, e consiste na mensuração índice de refletância do material, quando exposto a uma fonte luminosa, com filtro verde ($\lambda = 546 \text{ nm}$).

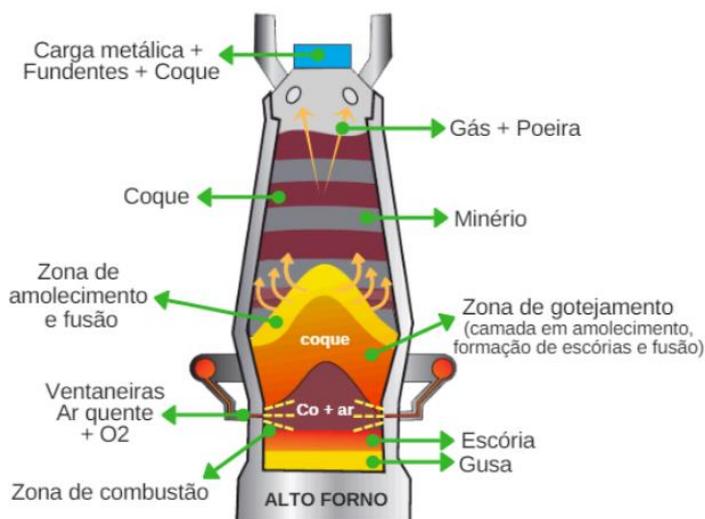
Passuelo (2004), comenta que existem outros métodos de avaliação de brancura dos materiais, além de alternativas para representação numérica de informações colorimétricas, como o Espaço de cor $L^*a^*b^*$ ou CIELAB, que será descrito no capítulo 03 - Metodologia do Estudo.

2.2 Escória Granulada de Alto Forno

2.2.1 Produção da Escória de Alto Forno (EAF)

A EAF é um coproduto siderúrgico oriundo da produção do aço, presente em suas etapas iniciais de fabricação. Sua formação ocorre quando as impurezas do minério de ferro junto aos materiais fundentes e os produtos de queima do combustível utilizado no alto forno, se fundem. Conforme demonstrado pela figura 2.4, o ferro, agora em um estado mais puro (ferro gusa), se deposita no fundo do equipamento, ao passo que a escória recém-formada, por ser mais leve, se concentra acima do metal (BARIN, 2008; DELLINGHAUSEN, 2009; CARDOSO et al., 2022).

Figura 2.4 - Esquema do funcionamento de um Alto Forno.



Fonte: Conexão Mineral, 2018.

Dentro do alto forno, a escória se encontra em uma elevada temperatura no estado líquido, e quando retirada, passa por um processo de resfriamento. O modo como esta etapa é realizada, ditará o comportamento da escória. Se resfriada lentamente, o material terá tempo para que seja formado um arranjo cristalino, o que resulta em uma escória menos reativa. De modo análogo à produção de cimento, se resfriada bruscamente, o processo de cristalização não ocorre, e o material solidificado se encontra em um estado amorfo (vítreo), com maior reatividade. Esta variedade vítrea, é de maior interesse para a obtenção de um comportamento de caráter aglomerante (JOHN E AGOPYAN, 2000; LÜBECK, 2008).

Para a produção de uma escória de alto forno vítrea, John e Agopyan (2000) descrevem o processo de granulação do material, que consiste em um resfriamento pela utilização de jatos de água sobre a escória recém retirada do forno, enquanto cai em queda livre em direção a um tanque com água. O resultado, conforme a figura 2.5, é um material com aspecto de areia grossa, com uma coloração próxima ao bege.

Figura 2.5 - Escória Granulada de Alto Forno.



Fonte: Acervo do autor.

2.2.2 Composição química da EAFG

Uma característica marcante da escória de alto forno está em sua composição, conforme apresentado por John e Agopyan (2000) na tabela 2.5, os principais óxidos que constituem o material são parecidos com os constituintes do cimento Portland. Além disso, a relação CaO/SiO_2 , agrupa as escórias em ácidas, quando a relação apresenta valor <1 , e em básicas para valores superiores.

Tabela 2.5 - Composição química da escória granulada de alto forno.

Componente	Escória básica (%)	Escória ácida (%)	Cimento Portland (%)
CaO	40 - 45	24 - 39	66
SiO ₂	30 - 35	38 - 55	22
Al ₂ O ₃	11 - 18	8 - 19	5
MgO	2,5 - 9	1,5 - 9	-
Fe ₂ O ₃	0 - 2	0,4 - 2,5	3

FeO	0 - 2	0,2 - 1,5	-
S	0,5 - 1,5	0,03 - 0,2	-
CaO/SiO ₂ média	1,31	0,68	3

Fonte: John e Agopyan, adaptado, 2000.

A diferenciação entre os tipos de escória é importante, pois para ser utilizado na fabricação de cimentos, a NBR 16697:2018 limita a utilização de escórias cuja razão entre a soma dos teores de CaO, Al₂O₃ e MgO com o teor de SiO₂, deve apresentar valor >1, o que pode inviabilizar o uso de escórias classificadas como ácidas em função da proporção dos principais óxidos componentes. Silva (2007 apud Veiga, 2011) e Massucato (2005) comentam que a escória ácida pode ser empregada como pozolana artificial, com posterior uso na fabricação de cimentos classificados como CP II-Z e CP IV.

A tabela 2.6 apresenta um compilado de composições das escórias utilizadas por pesquisas aos quais se incorporaram o coproduto a variedades de cimentos Portland. É possível notar que todas elas se encaixam ou se aproximam dos valores de escórias básicas apresentadas por John e Agopyan (2000).

Tabela 2.6 - Composição química de escórias utilizadas em pesquisas.

Componente (%)	Ling e Poon (2014)	Mota et al. (2019) - I e II		Couvidat et al. (2021) - I, II e III			Cardoso et al. (2022)
CaO	33,60	41,38	33,01	41,81	41,49	42,41	43,74
SiO ₂	43,80	35,72	34,09	37,37	37,57	37,28	34,99
Al ₂ O ₃	14,10	11,94	19,87	11,42	11,89	11,2	12,2
MgO	4,4	7,45	9,73	6,9	7,16	6,63	5,23
Na ₂ O	1,1	0,26	0,25	0,24	0,22	0,33	0,26
K ₂ O	-	0,27	0,84	0,37	0,41	0,5	0,41
Fe ₂ O ₃	1,1	0,84	0,45	0,74	0,35	0,4	0,56
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	0,49
MnO	-	-	-	0,3	0,29	0,27	0,3

SO3	1,2	1,38	0,75	1,47	0,86	1,22	-
S	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Cardoso et al. (2022) comentam que para serem consideradas como material cimentício, as escórias devem apresentar teores de CaO na faixa de 30%-45%, SiO₂ em 30%-48%, Al₂O₃ em 15%-25%, Fe₂O₃ 0.5%-2%, além de outros óxidos em menores quantidades. Os autores também concluíram que os coprodutos que se encaixam nesta classe, apresentam maior atividade hidráulica.

Embora ocorra essa similaridade com o cimento Portland em sua composição, a reação de hidratação da escória é lenta, uma vez que ela depende de um ambiente com elevado pH, que no caso do cimento, está na liberação de íons hidroxila, através da formação de Ca(OH)₂, por parte da hidratação do cimento. Os produtos dessa reação são próximos aos de hidratação das fases de silicatos cálcicos do cimento, o C-S-H, principal fonte de resistência do material após a hidratação. Essa capacidade de gerar produtos próximos aos do cimento, quando hidratados, configura a escória de alto forno um material cimentante (JOHN E AGOPYAN, 2000; DAL MOLIN, TUTIKIAN, 2022).

Por conta de sua reação com o hidróxido de cálcio, cimentos com escória apresentam um potencial de alcançar elevadas resistências, por conta do refinamento de poros e diminuição dos cristais de Ca(OH)₂ presentes na zona de transição do concreto (BARIN, 2008; DELLINGHAUSEN, 2009). Ao mesmo tempo, a incorporação do coproduto siderúrgico ao cimento permite reduzir a quantidade de clínquer no produto final, o que corrobora, em um primeiro caso, com o viés sustentável desta variedade de cimento (JOHN E AGOPYAN, 2000).

Apesar de seu potencial quanto à resistência mecânica, Schneider (2005) realizou uma sequência de testes com a incorporação de diferentes teores de escória em um cimento de classificação CPV, e relatou que quando comparado ao CPV de referência, ausente de escória, os demais teores tiveram um desempenho mecânico menor, apesar da proximidade da resistência mecânica em idade avançadas. Siqueira (2008) comenta que esses comportamentos em teores específicos, reforçam a noção de um teor ótimo para a incorporação da escória ao cimento.

Outro ponto a ser levantado na aplicação da escória de alto forno aos cimentos, está no melhor desempenho do material frente ao ataque de cloretos e sulfatos. A escória auxilia de duas maneiras: a primeira ocorre com a redução do teor de clínquer no produto, em vista da substituição por escória, uma vez que sua diminuição também implica na diminuição de fases mineralógicas mais suscetíveis ao ataque de sulfatos e a segunda ocorre pelo refinamento do esqueleto mineral da pasta hidratada, o que diminui a penetração de agentes químicos que possam prejudicar o desempenho do material (DELLINGHAUSEN, 2009; VEIGA, 2011).

2.2.3 Aplicação da EAFG na Construção Civil

A escória de alto forno já é um material comercialmente consolidado na indústria cimenteira no Brasil, através dos cimentos de classe II-E e III, que levam o material em sua composição.

A viabilização do material foi principalmente por conta de sua composição química, não apenas pela sua proximidade quando comparada a do cimento, mas também pelo próprio processo produtivo do aço. Neville (1997, apud Veiga, 2011) comenta que devido ao rigor do controle de qualidade realizado nas indústrias, ao mesmo tempo que o aço produzido possui características uniformes ao longo da cadeia produtiva, como consequência, a escória também passa a ter uma homogeneidade de sua composição.

Entretanto, ressalta-se o apontamento realizado por John e Agopyan (2000), a qual a oferta de variedades cimentícias com escória em sua composição depende da proximidade da fonte de produção deste coproduto siderúrgico em relação às fábricas cimenteiras. Além disso, apesar de existir um processo consolidado na fabricação de aço, variações entre as empresas quanto ao controle tecnológico e fonte de matérias-primas, embora possam gerar materiais com características homogêneas ao longo de sua cadeia produtiva, podem igualmente apresentar variações quanto à composição e comportamento quando comparadas a outros coprodutos oriundos de outras siderúrgicas.

Além da variação decorrente dos diferentes processos produtivos entre empresas siderúrgicas, a escória utilizada na fabricação das variedades II-E e III passam previamente por um processo de moagem. Segundo Dal Molin (TUTIKIAN, 2022) a

moagem do material gera um processo de “ativação física” e o torna mais reativo, uma vez que as reações de hidratação da EAF são mais lentas em relação ao clínquer. Portanto, variações no processo de moagem também podem interferir no desempenho do cimento (VEIGA, 2011).

Outro ponto observado em estudos com a aplicação de escória, está na maior trabalhabilidade que o produto oferece ao ser aplicado junto ao cimento. Para uma mesma relação água/aglomerante, a maior incorporação de escória implica em um aumento da parcela de água em contato inicial com o cimento, agora em menor quantidade, o que promove a trabalhabilidade da mistura. Este fato ocorre em função da baixa velocidade de reação das escórias, que promove um efeito de agregado fino nos momentos iniciais de mistura do concreto (MASSUCATO, 2005; BARIN, 2008; CARDOSO et al, 2022).

Uma característica observada em cimentos com a incorporação do coproduto, está em um estado temporário do material, que passa a apresentar uma coloração verde azulada, em função da transição eletrônica dos íons sulfetos presentes na hidratação do material. A ocorrência deste fenômeno é de baixa duração e a coloração desaparece em poucos dias ou semanas após o contato ao ar da peça concretada (SIQUEIRA, 2008; COUVIDAT et al., 2021).

Além das variedades de cimento já consolidadas, linhas de pesquisa com a escória de alto forno como aglomerante principal já existem e buscam propor uma alternativa ao cimento Portland principal. Os cimentos sem clínquer, possuem como principal atrativo o fato de que uma vez que a escória possui propriedades aglomerantes, é possível criar um cimento apenas, ou majoritariamente composto com este material, o que reduziria o impacto ambiental da produção de clínquer Portland, já que a uma alternativa oriunda de um coproduto siderúrgico não precisaria de um processo equivalente ao de sinterização, pois já passou por um na cadeia produtiva do aço (JOHN E AGOPYAN, 2000).

2.2.4 Estudos com a EAFG e CPB

A ideia de utilizar a escória na base de um CPB não é nova, a própria norma americana ASTM C150, comenta que o coproduto pode ser utilizado, desde que as condições colorimétricas sejam atendidas. Quando moída, a coloração bege do

material granulado dá lugar a uma coloração branca, o que a torna, em um primeiro momento, candidata para sua aplicação junto a um CPB.

Destaca-se o grupo de pesquisa da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com pesquisas dos autores Barin (2008), Dellinghausen (2009), Lübeck (2008), Siqueira (2008) e Veiga (2011). O grupo avaliou aspectos referentes ao desempenho do CPB com incorporação de escória de alto forno, tanto com ativador químico, quanto sem.

Os teores de incorporação escolhidos pelo grupo de pesquisa são de 50% e 70%, que se encaixam dentro dos teores estabelecidos até então pela norma vigente da época, a NBR 5735 - Cimento Portland de alto-forno, de 35% a 70% de escória incorporada. A posterior criação da NBR 16697:2018, cancelou e unificou as demais normas de requisitos de cada variação de cimento Portland comercializados, além de atualizar a faixa de incorporação para 35% a 75% de escória nos cimentos de classe III.

Jang et al. (2014) analisaram o comportamento colorimétrico de cimentos brancos com a incorporação de escória granulada, em teores de 20%, 40% e 60%. Os autores também consideraram os efeitos que a adição mineral poderia ter em uma aplicação do cimento junto à pigmentos. Também realizou-se análises quanto à trabalhabilidade, perda ao fogo e a resistência dos cimentos.

Ling e Poon (2014) analisaram a incorporação da escória em teores de 15%, 30%, 45%, 60% e 75% em argamassas com o uso de vidro reciclado como agregado, baseado em um estudo anterior dos mesmos autores. Entre os ensaios realizados, pertinentes à comparação para este estudo, destacam-se o ensaio de compressão axial (realizado posteriormente à tração a flexão), massa específica, espalhamento (mini flow-slump) e colorimetria.

Hosseini et al. (2017), utilizaram teores de 30% e 50% de escória em cimentos brancos junto à nanossílica estabilizada. Os autores realizaram uma bateria de estudos envolvendo a análise do desempenho das misturas, tanto no aspecto mecânico, com ensaios de resistência à compressão e tração a flexão, quanto ao comportamento das misturas em aspectos como resistividade elétrica, penetração de cloretos e absorção de água.

Mota et al. (2019), analisaram a influência de um ativador químico de sulfato de sódio em cimentos branco com incorporação de escória, em vista do baixo desenvolvimento de resistência nas idades iniciais do aglomerante com a adição. A bateria de ensaios realizados pelos autores envolveu além da resistência à compressão axial do cimento, a calorimetria do material.

A tabela 2.6, apresenta os valores encontrados pelos autores anteriormente citados, com ênfase nas características de interesse para este estudo.

	15%	-	-	-	-	-	-	-	-	74,50	17,80	-	40,20	68,10	80,20
	30%	-	-	-	-	-	-	-	-	74,00	15,70	-	41,20	61,10	74,40
	45%	-	-	-	-	-	-	-	-	70,00	8,00	-	35,80	58,00	68,80
	60%	-	-	-	-	-	-	-	-	67,50	10,40	-	36,70	52,20	68,50
	75%	-	-	-	-	-	-	-	-	67,50	4,30	-	31,20	44,00	52,70
	CPB	-	-	2,00	2,50	-	135	180	-	-	-	26,71	45,71	57,88	
Hosseini et al. (2017)	EAF	-	-	0,50	7,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,12	33,21	50,21	-
	50%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,52	26,73	41,76	-
	CPB	-	-	1,94	0,56	-	135	180	-	-	-	-	-	-	-
	EAF (I)	-	-	1,38	7,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mota et al. (2019)	EAF (II)	-	-	0,75	9,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70% (I)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00	12,00	24,00	38,00	46,00
	70% (II)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,00	12,00	26,00	40,00	46,00

* Os testes de brancura de Ling e Poon (2014) levam em conta a pasta já hidratada.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

De modo geral, todos os estudos apresentaram uma redução da resistência mecânica das misturas quando comparadas ao controle de cimento branco. Uma exceção está no trabalho de Ling e Poon (2014), a qual a incorporação em um teor de 15% apresentou uma maior resistência nas idades de 28 e 91 dias. Os autores reportam que o incremento observado se deve ao fato de que as reações de hidratação da escória, após a idade de 7 dias da hidratação do cimento, permitiram compensar a perda de resistência nas idades iniciais, ao densificar a matriz de C-S-H da mistura, entretanto o mesmo efeito não foi capaz de compensar um maior teor de substituição de cimento pela adição.

Outro ponto importante observado, foi a variação do índice de brancura dos experimentos. No grupo de trabalho da UFSM, todos os teores atenderam o valor exigido pela NBR NM 3, apesar de que o teor de 70% se encontra bem próximo do limite aceitável. Nos trabalhos de Ling e Poon (2004), apesar da avaliação ser feita em uma argamassa e não no cimento antes da hidratação, a utilização de vidro moído como substituto da massa de agregado diminuiu consideravelmente a brancura da peça final. Passuelo (2004), comenta que a coloração dos agregados deve ser levada em consideração, sobretudo os de fração graúda, uma vez que estes, quando não possuem coloração tão branca quanto à base em que estão, podem interferir no aspecto visual da peça, caso a camada de pasta sobre eles não seja suficiente para cobri-los.

3 METODOLOGIA DO ESTUDO

3.1 Programa Experimental

A fim de garantir que os objetivos sejam alcançados, criou-se um programa experimental para o desenvolvimento deste trabalho. O programa foi criado com base na NBR 16697:2018, com ênfase nos ensaios referentes aos requisitos químicos, físicos e mecânicos. Já os teores de incorporação da escória granulada de alto-forno foram escolhidos com base nos limites da composição do cimento Portland tipo III, contemplados pela ABNT NBR 16697:2018, porém optou-se por trabalhar apenas com o limite superior de 75% e um limite intermediário de 55%.

A divisão do programa contempla duas etapas (quadro 3.1), a primeira referente à caracterização dos materiais utilizados para posterior homogeneização e criação das matrizes cimentícias, para cada teor previamente estipulado de escória de alto-forno, enquanto a segunda é referente aos ensaios de análise referentes aos requisitos citados anteriormente.

Quadro 3.1 - Divisão de etapas do programa experimental

Programa Experimental	
Etapa 1	Homogeneização dos materiais e confecção das matrizes cimentícias nos teores de 0%, 55% e 75% de substituição parcial do clínquer de CPB.
	Caracterização dos materiais e das matrizes cimentícias.
Etapa 2	Avaliação do desempenho mecânico das matrizes produzidas pelo ensaio de resistência à compressão.
	Avaliação dos requisitos físicos.
	Avaliação dos requisitos químicos.

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A etapa 1 contempla os processos homogeneização da escória granulada de alto-forno ao clínquer branco nos teores estabelecidos, uma vez que o clínquer disponibilizado já se encontra moído e misturado com gesso. Após a criação das

matrizes, realizou-se a caracterização dos materiais usados para confecção e das misturas.

A matriz de controle, nomeada de EGAF-M 0%, é composta apenas de CPB, já as matrizes compostas de clínquer e escória granulada de alto-forno com teores de incorporação de 55% e 75% de, foram nomeadas de EGAF-M 55% e EGAF-M 75%.

A etapa 2 contempla os ensaios referentes para a análise de cada requisito prescrito na ABNT NBR 16697:2018. Para o requisito mecânico, adicionaram-se os ensaios de densidade de massa e índice de consistência, a fim de analisar essas propriedades das misturas enquanto frescas. O quadro 3.2 lista os procedimentos realizados em cada etapa, bem como a normativa referente ao ensaio.

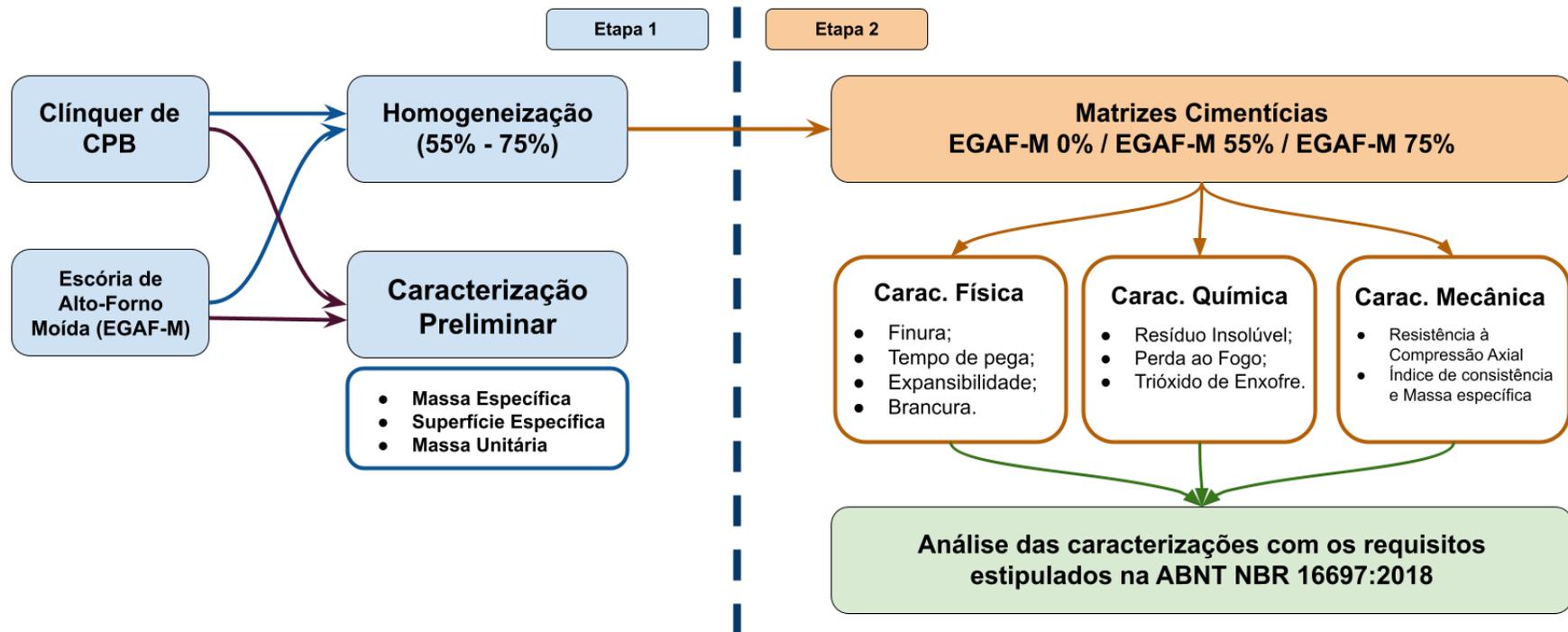
Quadro 3.2 - Listagem dos ensaios contemplados pelo programa experimental

Requisito	Ensaio	Normativa referente
Caracterização (etapa 1)	Massa Específica	ABNT NBR 16605:2017
	Superfície Específica	ABNT NBR 16375:2015
	Massa Unitária	ABNT NBR 12127:2019
Físico (etapa 2)	Resíduo na peneira 75µm	ABNT NBR 11579
	Pasta de consist. normal	ABNT NBR 16606
	Tempo de Início de Pega	ABNT NBR 16607
	Expansibilidade a Quente	ABNT NBR 11582
	Índice de Brancura	ABNT NBR NM 3
Químico (etapa 2)	Resíduo Insolúvel	ABNT NBR NM 15
	Perda ao Fogo	ABNT NBR NM 16
	Trióxido de Enxofre	ABNT NBR NM 18
Mecânico (etapa 2)	Resistência à Compressão Axial	ABNT NBR 7215:2019
	Densidade de massa*	ABNT NBR 13278:2005
	Índice de Consistência*	ABNT NBR 13276:2005

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

A partir da escolha dos ensaios, criou-se um fluxograma (Figura 3.1) para melhor visualização das atividades realizadas

Figura 3.1 - Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A partir do fluxograma montado, as variáveis (ou os fatores) de importância no desenvolvimento deste trabalho foram definidos. As classificadas como independentes ou controláveis são adotadas para que a partir dos ensaios, sua possível influência seja observada sobre as variáveis dependentes. Já as classificadas como dependentes ou de resposta, são as características que podem ser mensuradas e posteriormente analisadas quanto ao objeto de estudo (Ribeiro; Caten, 2011). O quadro 3.3 abaixo apresenta as variáveis de estudo, sua classificação, e níveis analisados:

Quadro 3.3 - Divisão e classificação das variáveis de estudo

Variáveis de estudo		Nº de Níveis	Níveis	
Independentes ou controláveis	Teores de substituição parcial da massa de clínquer por escória de alto-forno	3	0%, 55% e 75%	
	Idades dos corpos de prova	4	3, 7, 28, 91 dias	
Dependentes ou de resposta	Requisitos Físicos	Finura	-	-
		Tempo de Início de Pega	-	-
		Expansibilidade a Quente	-	-
		Índice de Brancura	-	-
	Requisitos Químicos	Resíduo Insolúvel	-	-
		Perda ao Fogo	-	-
		Trióxido de Enxofre	-	-
Requisitos Mecânicos	Resistência à Compressão Axial	-	-	

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Por fim, apresentam-se no quadro 4, os fatores constantes ao longo da etapa. Apesar de não serem contemplados como objeto de estudo deste trabalho (Ribeiro; Caten, 2011), estão associados às variáveis independentes.

Quadro 3.4 - Fatores constantes ao longo das etapas

Fatores Constantes
Procedimento de mistura, moldagem e cura: ABNT NBR 7215:2019
Cimento Portland branco
Clínquer moído com gipsita
Agregados miúdos para execução dos corpos de prova para ensaio de resistência à compressão axial
Processo de homogeneização e confecção das matrizes compostas
Iluminação do local das fotos das imagens para a análise colorimétrica

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento Portland Branco

O cimento Portland Branco utilizado como amostra de referência (EGAF-M 0%) para as matrizes compostas é proveniente da empresa PROVALE, localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no estado do Espírito Santo.

O cimento doado é classificado como CPB 40, segundo a norma ABNT NBR 16697:2018.

3.2.2 Clínquer de Cimento Portland Branco

O clínquer utilizado para confecção das matrizes cimentícias (EGAF-M 55%/75%) também foi de fornecimento da empresa PROVALE e está demonstrado pela figura 3.2. O material foi recebido previamente moído e com a adição de gipsita.

Figura 3.2 - Sacos de Clínquer e Cimento após o recebimento (I), aspecto visual dos materiais (II e III)



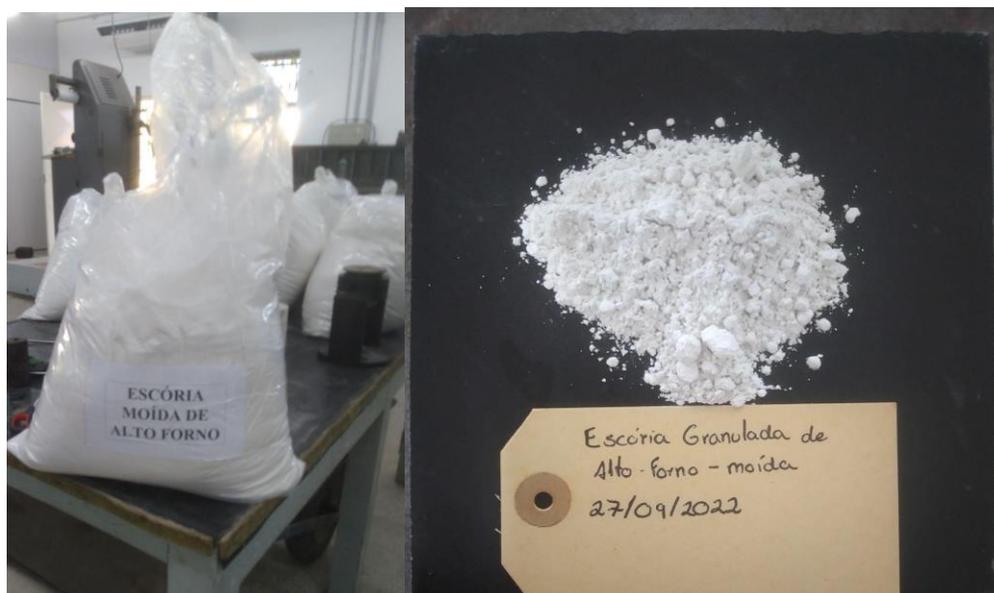
Fonte: Acervo do autor.

3.2.3 Escória Granulada de Alto-Forno

Para a confecção das matrizes cimentícias, utilizou-se a escória granulada de alto-forno apresentada na figura 3.3, que foi previamente moída, fornecida pela empresa Cimentos Mizu, localizada no Complexo Industrial Tubarão, na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo. O material é um coproduto siderúrgico, oriundo do processo

de fabricação do ferro gusa, realizado pela ArcelorMittal, localizada no Polo Industrial Tubarão, no município de Serra, no estado do Espírito Santo.

Figura 3.3 - Material após recebimento (I) e aspecto visual da escória granulada moída (II)



(I)

(II)

Fonte: Acervo do autor.

3.2.4 Matrizes Compostas

Conforme mencionado no tópico de programa experimental, para este trabalho adotaram-se as incorporações nos níveis de 55% e 75% de escória granulada de alto-forno moída em relação à massa de clínquer de cimento Portland Branco.

Para a confecção das matrizes cimentícias, utilizou-se o moinho de bolas, demonstrado na figura 3.4, no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção LEMAC-UFES. Como o equipamento é de uso compartilhado com outras pesquisas em andamento na universidade, foram tomadas algumas precauções em função de possíveis contaminações no material, tanto em termos de composição química, quanto em função da cor das matrizes.

Figura 3.4 - Moinho utilizado para confecção das matrizes compostas



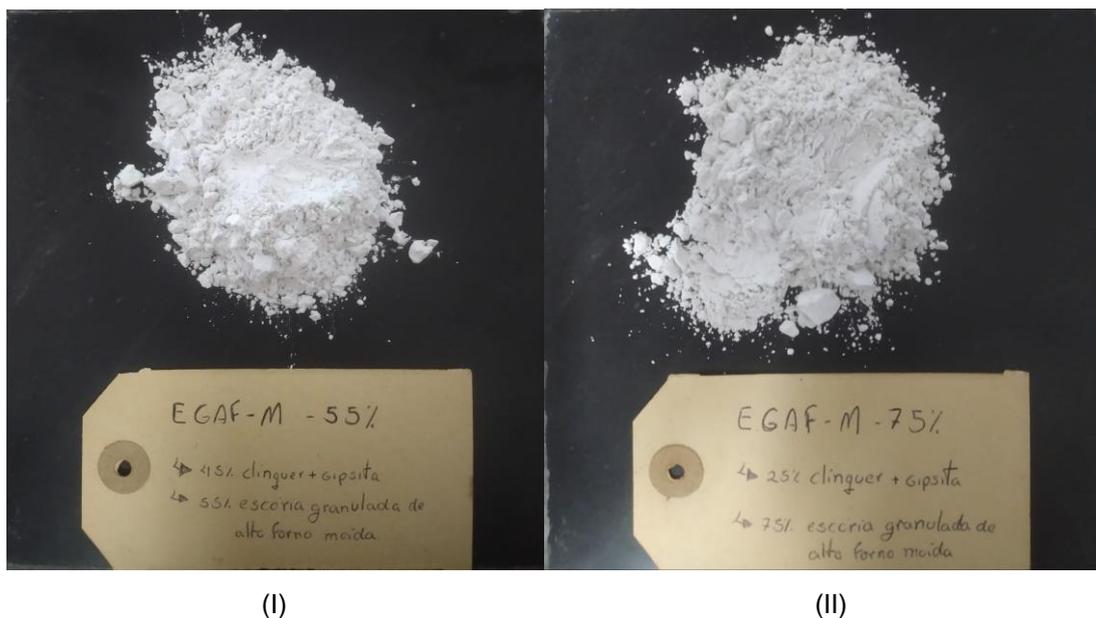
Fonte: Acervo do autor.

Primeiramente, realizou-se uma moagem para limpeza preliminar do tambor de moagem, com o auxílio da areia disponível no laboratório, a fim de soltar quaisquer materiais que possam estar presos nas paredes do compartimento. Em seguida, retiraram-se todas as esferas metálicas do tambor de moagem e realizou-se uma limpeza no interior do compartimento e da carcaça do equipamento responsável pelo despejo do material moído.

Para diminuir os riscos de contaminação das matrizes, ambientou-se o interior do tambor de moagem com um ciclo de 5 minutos apenas com a escória de alto-forno moída, sem a utilização das esferas metálicas, visto que poderiam contaminar a coloração das matrizes compostas.

Com o equipamento pronto para o processo de homogeneização, adotou-se um ciclo de 30 minutos para cada teor de incorporação, em rodadas de no máximo 5kg totais de material, em função da limitação do moedor. A figura 3.5 mostra os aspectos visuais de cada matriz após o processo homogeneização.

Figura 3.5 - Aspecto visual das matrizes EGAF-M 55% (I) e EGAF-M 75% (II)



Fonte: Acervo do autor.

3.2.5 Água

A água utilizada para confecção nos ensaios determinados pelo programa experimental é de origem da concessionária de abastecimento CESAN, do município de Vitória. Conforme o item 3.2 da ABNT NBR 15900-1:2009, a realização de ensaios para verificação dos requisitos estipulados pela normativa não se faz necessária.

3.2.6 Agregado miúdo

Para a confecção dos corpos de prova do ensaio de compressão à resistência axial, foram utilizados agregados da série normal brasileira, de produção e fornecimento pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, conforme especificações da normativa ABNT NBR 7214:2015 - Areia normal para ensaio de cimento.

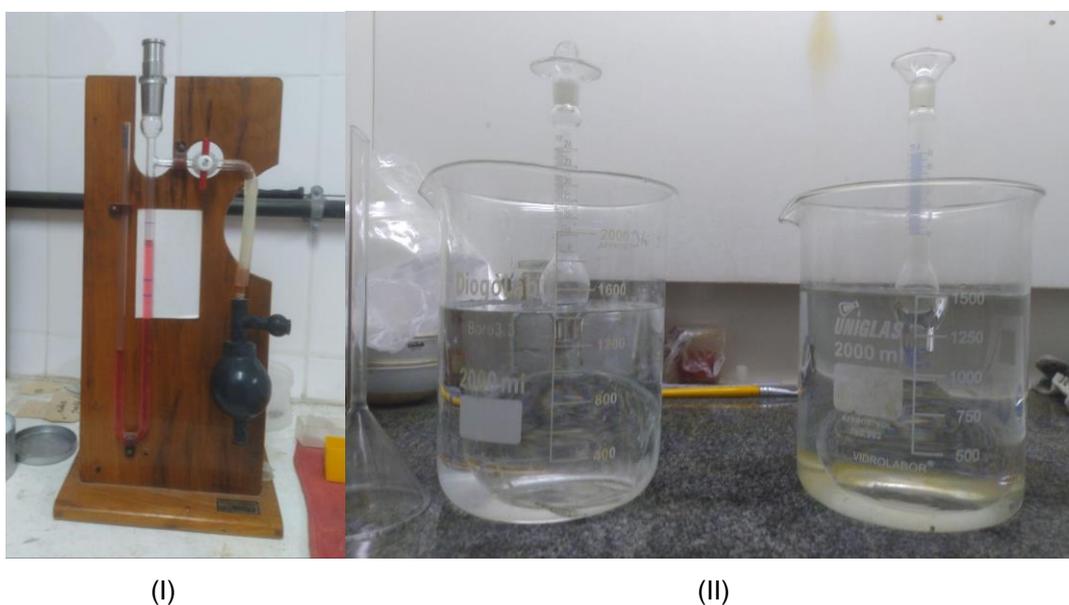
3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização Preliminar

Os ensaios, que neste trabalho estão agrupados e nomeados como ensaios de caracterização preliminar, embora não estejam contemplados pelas tabelas de requisitos físicos, químicos e mecânicos, são, ou referenciados pela NBR 16697:2018 como indispensáveis para a aplicação da referida norma, ou cuja resposta é de interesse para discussão deste estudo.

Para tanto, realizaram-se os ensaios referentes às normas ABNT NBR 16372:2015 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine) e ABNT NBR 16605:2017 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. A figura 3.6 apresenta a aparelhagem utilizada para execução dos ensaios.

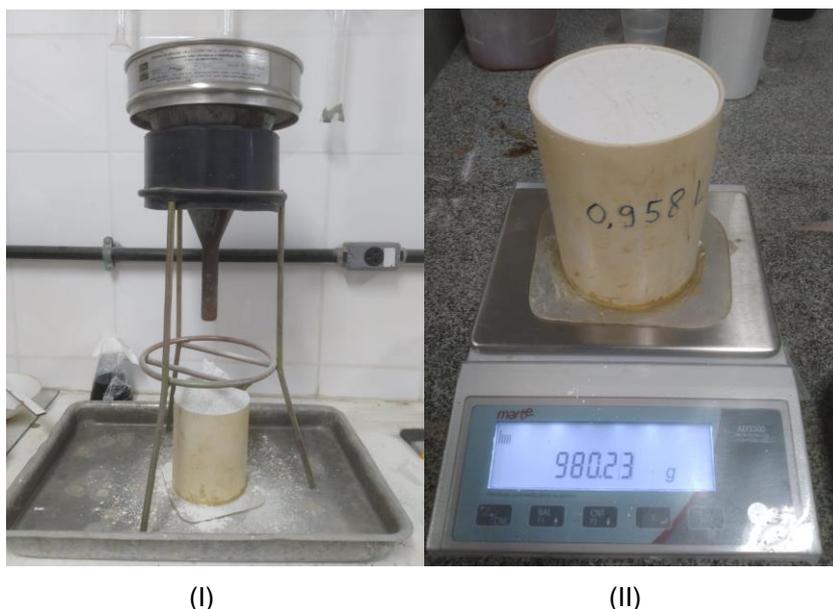
Figura 3.6 - Aparelhagem para os ensaios relativos à NBR 16372:2015 (I) e à NBR 16605:2017 (II)



Fonte: Acervo do autor.

Embora a normativa esteja cancelada, realizou-se também o procedimento referente à norma ABNT NBR 12127:2019 - Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas do pó, para a obtenção da característica de massa unitária dos materiais, conforme demonstrado na figura 3.7.

Figura 3.7 - Aparelhagem para a massa unitária da NBR 16372:2015 (I) e amostra do ensaio (II)



Fonte: Acervo do autor.

Realizada a caracterização preliminar dos materiais e das matrizes, a tabela 3.1 apresenta os valores obtidos ao final de cada ensaio.

Tabela 3.1 - Resultado da caracterização preliminar

Material	Propriedade		
	Massa Específica (g/cm ³)	Superfície Específica (cm ² /g)	Massa Unitária (g/cm ³)
Clínquer de cimento Portland Branco	3,00	430,14	0,79
Escória Granulada de Alto-Forno Moída	2,88	407,35	0,85
EGAF-M 0%	3,00	404,68	0,78
EGAF-M 55%	2,98	424,61	0,72
EGAF-M 75%	2,91	406,78	0,70

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

3.3.2 Caracterização Física

A caracterização física das matrizes compostas seguiu os requisitos estipulados pela tabela 4 da ABNT NBR 16697:2018, com as características referentes à finura (resíduo na peneira 75 μ m), ao tempo de início de pega e expansibilidade a quente, a aparelhagem utilizada está apresentada na figura 3.8.

Figura 3.8 - Aparelhagem para os ensaios relativos ao resíduo na peneira 75 μ m (I), tempo de início/final de pega (II), expansibilidade a quente/frio (III) e banho térmico para o ensaio (IV)



(I)

(II)



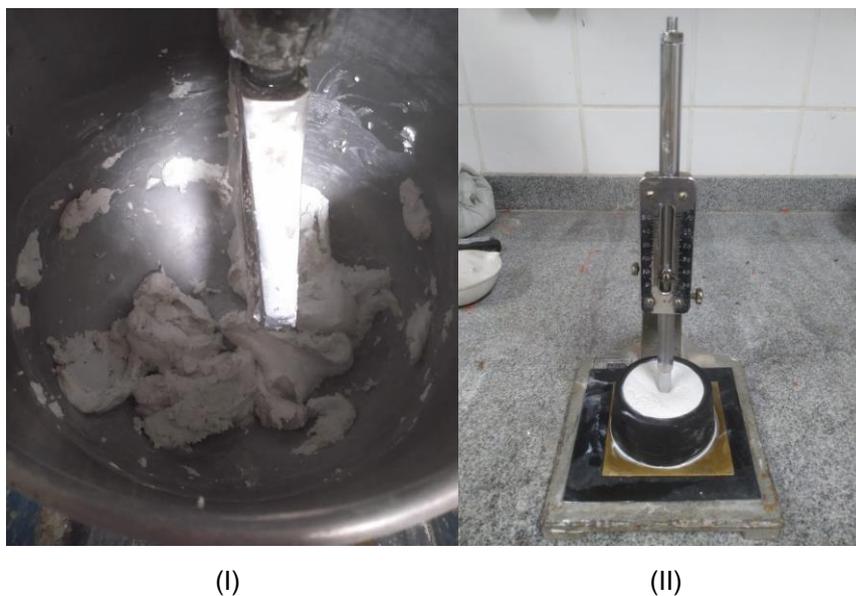
(III)

(IV)

Fonte: Acervo do autor.

Além dos ensaios referentes aos requisitos da norma, para a execução dos ensaios de tempo de início de pega e expansibilidade, se faz necessária a execução do procedimento da ABNT NBR 16606 - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal, para determinação do teor de água para realização dos ensaios, mostrada na figura 3.9.

Figura 3.9 - Aspecto visual da pasta de cimento na argamassadeira (I) e posterior ensaio no aparelho de Vicat com a sonda de Tetmajer (II)



Fonte: Acervo do autor.

Os teores encontrados para cada uma das matrizes estão demonstrados na tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Resultado da caracterização preliminar referente à água de pasta de consistência normal

Água para pasta de consistência normal	
Matriz	Teor de água (em relação à massa de cimento)
EGAF-M 0%	28,02%
EGAF-M 55%	30,50%
EGAF-M 75%	30,40%

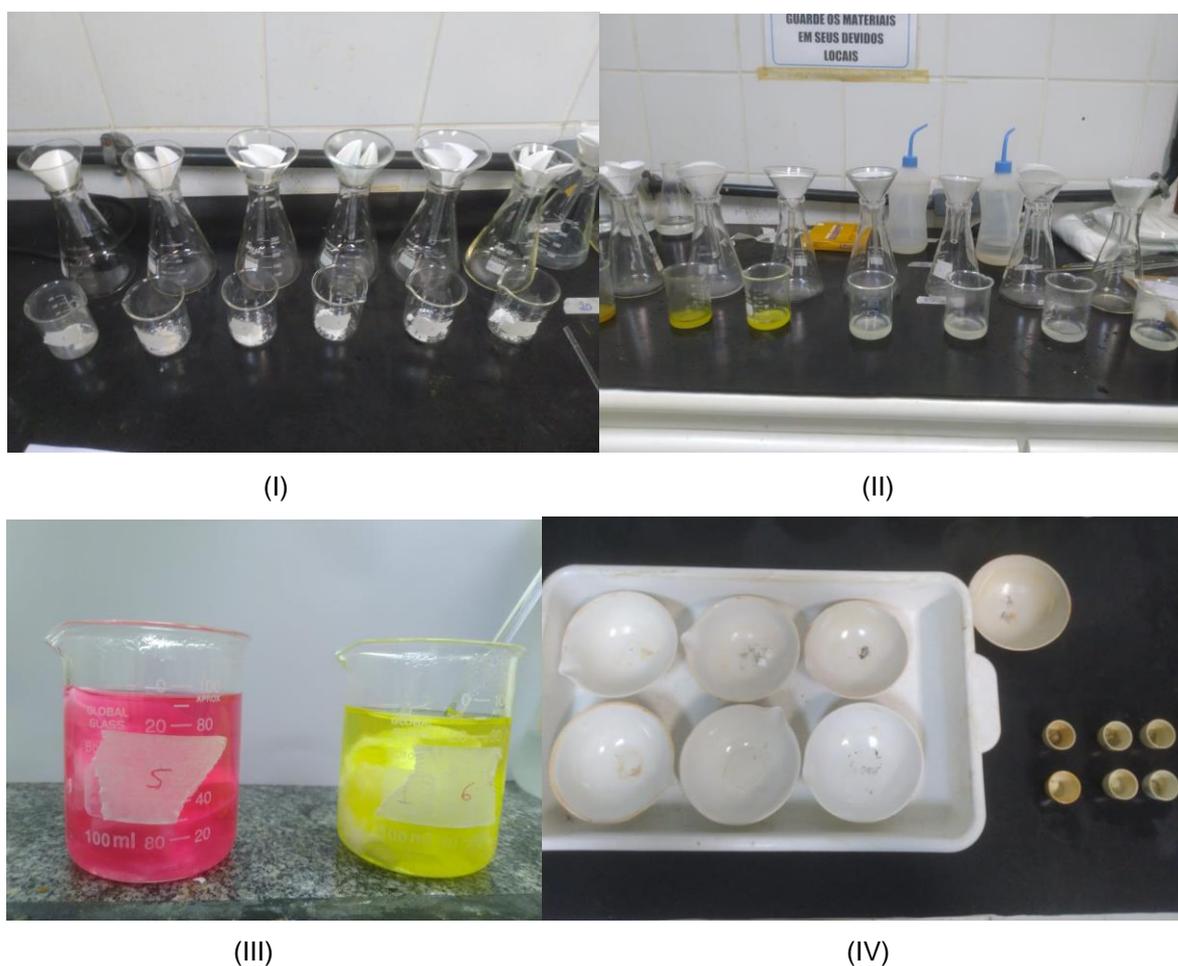
Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Todos os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção LEMAC-UFES.

3.3.3 Caracterização Química

A caracterização química das matrizes compostas seguiu os requisitos estipulados pela tabela 3 da ABNT NBR 16697:2018, com as características referentes ao resíduo insolúvel, à perda ao fogo, ao trióxido de enxofre e ao óxido de magnésio, conforme demonstrados pela figura 3.10.

Figura 3.10 - Vidrarias para o ensaio de resíduo insolúvel/trióxido de enxofre (I), etapa inicial de ataque ácido às amostras (II), verificação final da presença de cloretos no ensaio de RI (III) e amostras de RI e PF após processo de calcinação.



Fonte: Acervo do autor.

Todos os ensaios de caracterização química foram realizados no Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos - LACAR, dentro das instalações do Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção LEMAC-UFES.

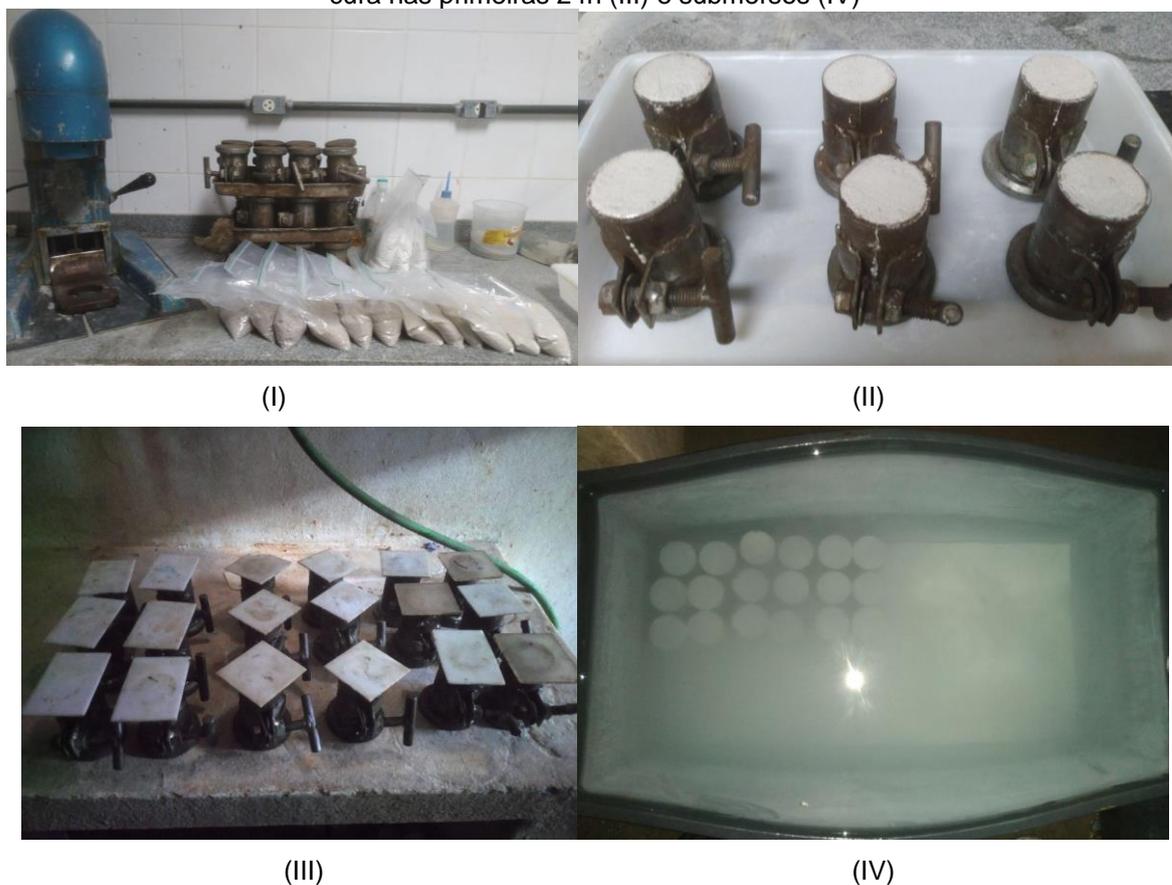
3.3.4 Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica das matrizes compostas é avaliada pelo procedimento ABNT NBR 7215:2019 - Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2019).

Para a realização da avaliação do desempenho mecânico, realizou-se a moldagem de 5 corpos de prova cilíndricos, de dimensões 50x100mm, para cada teor estipulado (0%, 55% e 75%) e para cada idade de rompimento (3, 7, 28 e 91 dias), em um total de 48 CPs para este ensaio. A mistura e a moldagem foram realizadas no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção LEMAC-UFES.

Após sua confecção, conforme demonstrado pela figura 3.11, os corpos de prova foram levados para câmara úmida, para o processo de cura. Nas primeiras 24h, o processo ocorreu pelo repouso do material no local a $23\pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa acima de 90% e posteriormente colocados em um tanque com água e cal, submersos, até as respectivas idades de rompimento.

Figura 3.11 - Materiais separados anterior ao preparo dos CPs (I), CPs finalizados (II), processo de cura nas primeiras 24h (III) e submersos (IV)



Fonte: Acervo do autor.

Junto à confecção dos corpos de prova, realizaram-se os ensaios de índice de consistência e densidade de massa (figura 3.13), referente às respectivas normas ABNT NBR 13276:2005 e ABNT NBR 13278:2005. Ao total, foram executadas 3 moldagens para cada matriz analisada.

Figura 3.12 - Recipiente utilizado para densidade de massa (I), leitura da massa após preenchimento (II) e amostra de argamassa após a aplicação de golpes pelo flow table



Fonte: Acervo do autor.

Após os corpos de prova chegarem na idade marcada para os rompimentos, foram escolhidos um total de 4 CPs para cada ensaio, ao passo que em cada grupo houve o cuidado de garantir que haveria um corpo de prova de cada moldagem realizada. Além do ensaio de compressão axial, realizou-se uma verificação quanto à massa específica da amostra no estado endurecido.

3.3.5 Análise Colorimétrica

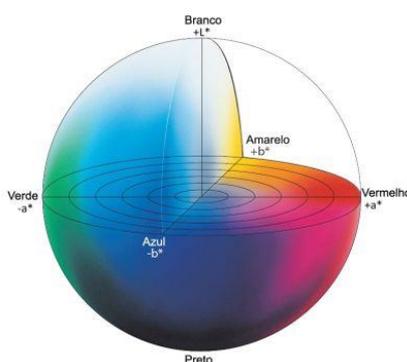
A avaliação da brancura é realizada conforme o procedimento na ABNT NBR NM 03:2000: Cimento Portland branco - Determinação da brancura. Para este ensaio, utiliza-se um reflectômetro ou fotocolorímetro para medir a reflectância luminosa da amostra, conforme as orientações da norma. Em posse do valor obtido, conforme o item A.3 do anexo A da ABNT NBR 16697:2018, a brancura é submetida a um controle estatístico e é aceito apenas caso obtenha-se uma porcentagem acima de 78% para o CPB de uso estrutural ou 82% para uso não estrutural.

Devido à ausência de um reflectômetro/fotocolorímetro no laboratório utilizado pelo autor, buscou-se uma alternativa para realização da análise colorimétrica. Propõem-se então uma adaptação combinada das metodologias utilizadas por Passuelo (2004), Nascimento (2018) e Oliveira et al. (2019), por meio da análise da variação

colorimétrica do material pelo espaço de cor $L^*a^*b^*$ através de dados obtidos por imagens.

O espaço de cor $L^*a^*b^*$ (ou CIELAB) é composto de três eixos: “ L^* ” referente à característica de luminosidade (branco e preto); “ a^* ” referente aos espaços de cores entre o vermelho e verde; e “ b^* ” referente aos espaços de cores entre o amarelo e o azul, conforme demonstrado pela figura 3.13. Apesar de o espaço de maior interesse ser o “ L^* ”, uma vez que a propriedade de interesse é a brancura das matrizes cimentícias, propõem-se aqui também a utilização dos espaços “ a^* ” e “ b^* ” para a eventual análise da variação colorimétrica que a incorporação da escória granulada de alto-forno venha causar nas matrizes compostas.

Figura 3.13 - Representação do Espaço de Cor $L^*a^*b^*$ /CIELAB



fonte: MINOLTA, 2016.

Para a execução da aferição colorimétrica, conforme mostrado na figura 3.14, foram confeccionadas placas com as matrizes ainda em pó, prensadas e posteriormente curadas na câmara úmida por uma semana, com dimensões de 10cm x 10cm. Para este trabalho, decidiu-se realizar a verificação apenas para as 3 matrizes. Outra medida adotada para análise das fotos, está em uma breve edição nos cantos superior esquerdo e direito da imagem, para a inserção de dois pontos correspondentes ao valor máximo de brancura (branco) e o mínimo (preto), a fim de poder melhor demonstrar a proximidade das amostras com os absolutos de luminosidade da escala $L^*a^*b^*$

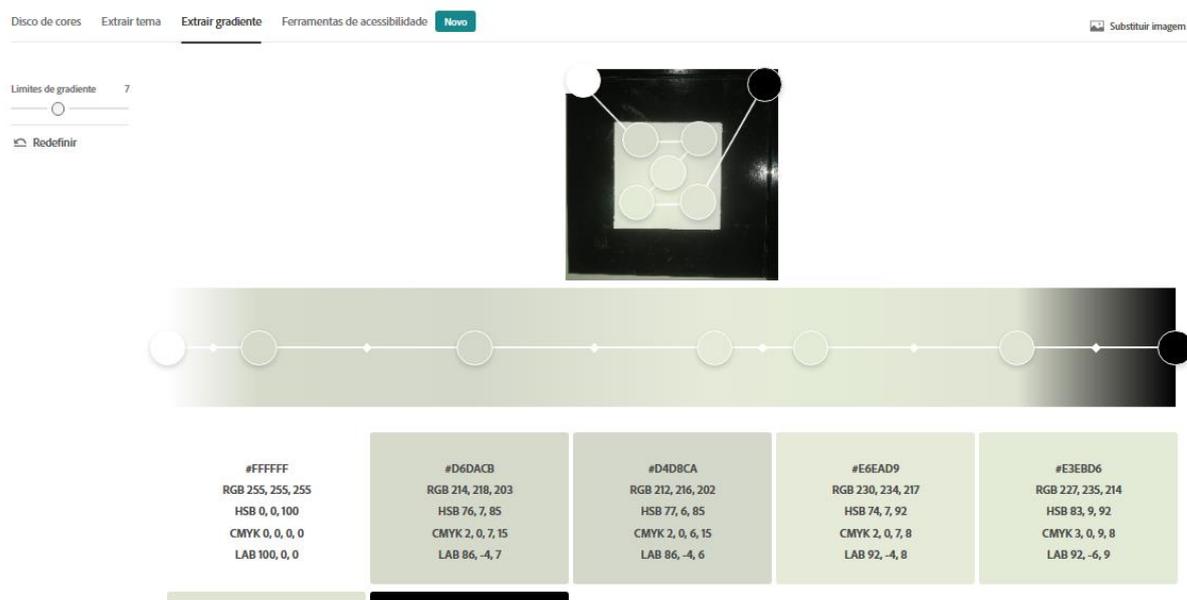
Figura 3.14 – Exemplo de imagem para análise do ensaio



Fonte: Acervo do autor.

Para a aferição da brancura, propôs-se utilizar o mesmo método de Oliveira et al. (2019), que consiste na captura de imagem das amostras e posterior obtenção da cor através de um programa de edição que possa fornecer o código hexadecimal da cor de um ponto da amostra. O programa utilizado é a ferramenta de cores disponível no site Adobe Colors (<https://color.adobe.com/pt/create/image-gradient>), já que é um programa de acesso aberto, e permite não apenas a extração do código hexadecimal da cor, como também as coordenadas L*a*b* do ponto escolhido. A figura 3.15, mostra a interface da página da ferramenta.

Figura 3.15 – Interface da página Adobe Colors e método de análise



Fonte: Acervo do autor (2023).

Conforme demonstrado, a ferramenta utilizada é a “Extrair gradiente”, pois ela permite uma escolha de 3 a 15 pontos sobre a imagem selecionada, através da seleção em “Limites de gradiente”. Após a escolha dos pontos de interesse, o programa gera uma barra logo abaixo da imagem, que mostra o gradiente gerado pela ordem dos pontos adotados, e logo abaixo, a informação sobre a cor da área analisada, com seu respectivo código hexadecimal e valores em outros códigos de cor. Para este estudo, será realizada uma média de 5 pontos escolhidos sobre as imagens.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Requisitos Químicos

4.1.1 Resíduo Insolúvel (RI)

A tabela 4.1 mostra os resultados encontrados no ensaio de RI sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.1 - Valores de resíduo insolúvel para as matrizes

Material	Massa amostra(g)	Massa recipiente vazio (g)	Recipiente + RI (g)	RI (%)	RI médio (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
CPB - EGAF - M 0%	1,000	116,180	116,181	0,030	0,055	≤ 3,5
	1,000	117,427	117,427	0,080		
CPB - EGAF - M 55%	0,999	125,115	125,117	0,150	0,165	
	0,999	113,621	113,622	0,180		
CPB - EGAF - M 75%	1,001	118,136	118,139	0,310	0,305	
	1,001	81,971	81,974	0,300		

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Nota-se que o aumento do teor de escória nas matrizes foi proporcional aos valores de RI encontrados pelo ensaio. Apesar disso, todos os valores estão conforme o limite estabelecido pela norma de requisitos de cimento Portland, de uma porcentagem menor que 3,5% para cimentos brancos estruturais e 7% para não estruturais.

Em relação ao aumento observado, conforme apontado na seção 2.1.3 deste trabalho, pode ser justificado por conta do controle de qualidade do processo produtivo do CPB. Devida à maior rigidez do processo para garantia da coloração branca, ao incorporar um material que não passou pelos mesmos processos de triagem de matéria-prima da fábrica de CPB, como é o caso da escória utilizada, valores maiores de RI podem estar associados a essas impurezas provenientes do coproduto.

4.1.2 Perda ao Fogo (PF)

A tabela 4.2 mostra os resultados encontrados no ensaio de PF sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.2 - Valores de perda ao fogo para as matrizes

Material	Massa amostra(g)	Massa recipiente vazio (g)	Recipiente + amostra calcinada (g)	PF (%)	PF médio (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
CPB - EGAF - M 0%	1,001	8,552	9,502	5,135	5,133	≤ 12,0
	1,000	8,128	9,077	5,132		
CPB - EGAF - M 55%	1,006	7,891	8,887	0,945	0,986	
	1,002	8,389	9,381	1,028		
CPB - EGAF - M 75%	1,009	7,816	8,824	0,050	0,035	
	1,004	8,110	9,114	0,020		

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Nota-se agora, que ao contrário do ensaio de RI, os valores de PF foram inversamente proporcionais ao aumento do teor de escória de alto-forno. O valor da mistura de referência já se encaixava dentro do limite de 12% para cimentos estruturais e 27% para não estruturais requisitados por norma, e por conseguinte, os valores das matrizes com escória também se adequam.

Esse comportamento está coerente com o esperado para as maiores adições de escória às matrizes cimentícias, pois uma vez que o ensaio de PF está relacionado com a possível hidratação e/ou carbonatação do cimento anterior ao seu uso e como a escória possui uma menor reatividade, ao passo que depende da hidratação do clínquer em si para de fato começar as próprias reações, menores valores de PF para uma maior massa de coproduto no cimento configuram um resultado adequado.

De modo análogo, no grupo de trabalho da UFSM (2008-2009), no estudo de Jang et al. (2005) e Ling e Poon (2014), ensaios realizados separadamente no CPB e na EAF demonstraram um maior valor de PF para o aglomerante, quando comparado ao coproduto.

4.1.3 Trióxido de Enxofre/Anidrido Sulfúrico (SO₃)

A tabela 4.3 mostra os resultados encontrados no ensaio de trióxido de enxofre sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.3 - Valores de SO₃ para as matrizes.

Material	Massa amostra(g)	Massa recipiente vazio (g)	Recipiente + Precipitado (g)	SO ₃ (%)	SO ₃ médio (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
CPB - EGAF - M 0%	0,999	113,624	113,715	3,15	3,162	≤ 4,5
	0,999	120,382	120,474	3,18		
CPB - EGAF - M 55%	1,001	118,147	118,194	1,59	1,616	
	1,001	117,433	117,481	1,64		
CPB - EGAF - M 75%	1,000	120,182	120,209	0,93	0,931	
	1,000	136,444	136,472	0,93		

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

De modo análogo ao observado no ensaio de PF, os teores referentes ao SO₃ das matrizes foram inversamente proporcionais ao teor de incorporação de EAF. O valor da mistura de referência já se encontrava no limite estipulado por norma, de menor que 4,5% para ambas as classificações que o CPB pode ter.

A presença de enxofre está relacionada com a queima dos combustíveis, tanto na produção do cimento quanto na produção do aço, ao passo que a escória recebe a carga de impurezas vinda da produção do ferro gusa (PECCHIO, 2003; MASSUCATO, 2005). Em ambos os casos, o enxofre pode ser prejudicial ao desempenho de ambos os materiais.

Embora John e Agopyan (2000) apresentam que a principal expressão do enxofre na EAF seja na forma de sulfeto, os estudos de Jang et al. (2014), Ling e Poon (2014), Hosseini et al. (2017) e Mota et al. (2019), apresentam valores de SO₃ nas escórias utilizadas em suas pesquisas. Apesar disso, todos os valores encontrados são menores quando comparados ao do cimento.

4.2 Requisitos Físicos

4.2.1 Finura (%) - Resíduo na Peneira 45 µm

A tabela 4.4 mostra os resultados encontrados no ensaio de finura sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.4 - Valores em % de material retido médio para as matrizes.

CPB - EGAF - M 0% (%)	CPB - EGAF - M 55% (%)	CPB - EGAF - M 75% (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
0,80	1,17	0,60	≤ 12,0

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Todos os valores encontrados se encontram dentro da faixa limite estipulado pela norma de requisitos, de menor ou igual a 20%. O resultado já era esperado, pois tanto o clínquer branco e a escória utilizada foram entregues pelos fornecedores já moídos para uso em cimenteiras.

O maior resultado no teor de 55% pode ser atribuído a algum material que tenha ficado retido nas paredes da peneira ao longo do ensaio, visto que para a matriz pura e para com maior teor de escória, os resultados foram menores.

4.2.2 Tempos de início e final de pega

A tabela 4.5 mostra os resultados encontrados no ensaio de finura sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.5 - Valores em minutos dos tempos de início e fim de pega das matrizes.

Matriz	CPB - EGAF - M 0%	CPB - EGAF - M 55%	CPB - EGAF - M 75%	ABNT NBR 16697:2018
Início de pega (min)	76	102,5	120,5	≥ 60
Início de pega corrigido (min)	75	100	120	

Final de pega (min)	129	155,5	181,5	
				≤ 600
Final de pega corrigido (min)	120	150	180	

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Todos os tempos de início e final de pega se encaixam no período estipulado pela norma de requisitos, o qual o limite inferior para início é de 60 minutos e o limite superior para final é de 600 minutos.

Conforme constatado, é possível perceber um aumento proporcional dos tempos de pega com a incorporação de escória das matrizes. Este comportamento também foi observado pelo grupo de pesquisa da UFSM, embora tenham analisado apenas o tempo de início. Este incremento está relacionado diretamente com a lenta hidratação que a escória possui, uma vez que depende da hidratação do clínquer para posterior liberação de cal e facilitar o início da reação do coproduto, teores mais altos implicam em uma menor massa de clínquer hidratada.

Apesar disso, nota-se a diferença entre os valores encontrados neste trabalho com o grupo de pesquisa da UFSM, o qual apresentou valores de tempos maiores para todas as matrizes. Este fato não é explicado pela finura dos materiais, uma vez que o grupo de pesquisa utilizou materiais com maior finura (5070 cm²/g para o cimento e 4090 cm²/g para escória), em comparação aos utilizados neste estudo (4301 cm²/g para o cimento e 4073 cm²/g para escória).

Uma explicação que pode ser utilizada está nos estudos de composição realizados por Kirchheim (2005), conforme demonstrado anteriormente na tabela 2.4, os cimentos brancos podem ter diferentes concentrações das principais fases mineralógicas. Portanto uma justificativa esteja em maiores concentrações das fases mais reativas, o C₃S e o C₃A, no cimento utilizado neste trabalho em comparação ao material do grupo de pesquisa.

4.2.3 Expansibilidade a quente

A tabela 4.6 mostra os resultados encontrados no ensaio de expansibilidade a quente, sobre as 3 matrizes cimentícias:

Tabela 4.6 - Valores em mm de expansibilidade das matrizes.

	CPB - EGAF - M 0% (%)	CPB - EGAF - M 55% (%)	CPB - EGAF - M 75% (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
Expansibilidade (mm)	0,47	0,28	0,26	≤ 5,0

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

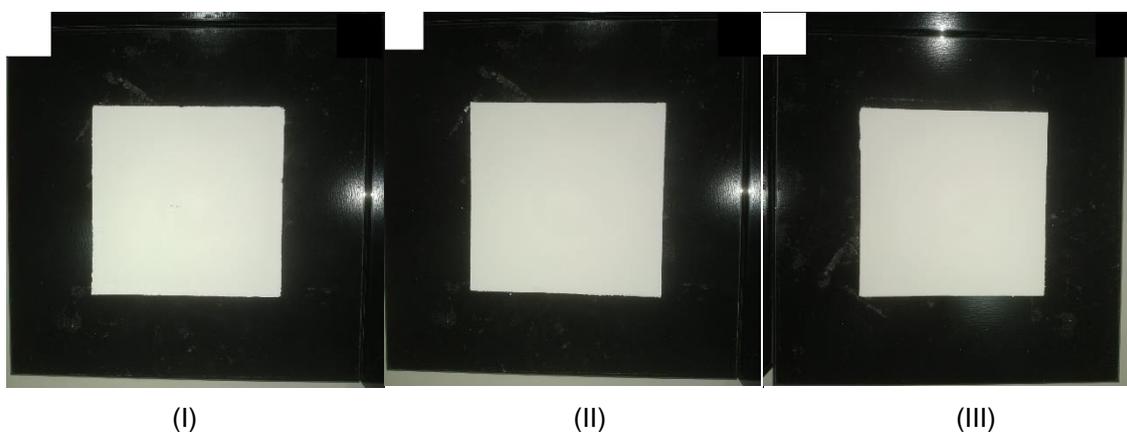
Todos os valores de expansibilidade encontrados estão de acordo com o limite exigido pela norma de requisitos, com o limite máximo de até 5mm de expansão. Dentre as matrizes, o maior valor observado está na referência, enquanto as misturas apresentaram valores próximos de expansibilidade.

A menor expansão entre as matrizes observadas pode ser explicada pela própria composição da escória, que possui um menor teor de CaO, aliada a menor velocidade de hidratação comparado ao cimento.

4.2.4 Brancura

Para o ensaio de brancura, foram escolhidas 3 imagens para a avaliação da cor das matrizes. A figura 4.1 mostra respectivamente as imagens das placas da matriz EGAF-M 0%, EGAF-M 55% e EGAF-M 75%.

Figura 4.1 - Fotos utilizadas para a análise colorimétrica EGAF-M 0% (I), EGAF-M 55% (II) e EGAF-M 75% (III)



Fonte: Acervo do autor (2023)

As imagens foram lançadas na ferramenta online e configurou-se para pegar a informação de 5 pontos sobre as placas, além das informações de luminosidade absoluta (branco e preto, localizados no topo das imagens). A Tabela 4.7, mostra o resultado da análise, já com a média da coordenada L^* dos pontos arbitrados.

Tabela 4.7 - Coordenadas $L^*a^*b^*$ das amostras

Material	Área	Código da cor em hexadecimal	Coordenada			Brancura (%)	ABNT NBR 16697:2018 (%)
			L^*	a^*	b^*		
EGAF-M 0%	1	#D6DACB	86	-4	7	89,2	≥ 78
	2	#D4D8CA	86	-4	6		
	3	#E6EAD9	92	-4	8		
	4	#E3EBD6	92	-6	9		
	5	#E0E4D3	90	-4	8		
EGAF-M 55%	1	#CBCDBF	82	-3	7	84	
	2	#CBCBBF	81	-2	6		
	3	#DADBCD	87	-3	7		
	4	#D6D9C8	86	-4	8		
	5	#D0D2C4	84	-3	7		
EGAF-M 75%	1	#CCCCCC0	82	2	6	84,2	
	2	#D1D1C5	84	-2	6		
	3	#DBD9CC	87	-2	7		
	4	#CCCEC0	82	-3	7		
	5	#D7D9CB	86	-3	7		

Fonte: Acervo do autor (2023)

A análise colorimétrica realizada mostra que para todas as matrizes, o valor de 78% de brancura foi atingido, ao passo que a matriz de controle possui o maior valor de reflectância observado, de modo análogo aos estudos do grupo de pesquisa da UFSM, Jang et al. (2014) e Ling e Poon (2014).

Um ponto importante observado, está nas coordenadas a^* , referente a faixa que compreende verde e vermelho no espaço $L^*a^*b^*$. A matriz de controle apresentou valores de $-a^*$ menores comparado ao das matrizes com escória. Esta maior tendência ao verde foi apontada por Moresová e Škvará (2001), que explicam a cor pela presença dos óxidos de ferro no CPB.

Apesar da brancura analisada ter sido atendida, salienta-se aqui que a metodologia utilizada é uma adaptação, e fatores externos não contemplados na norma podem afetar o resultado da análise, como o local utilizado para captura das imagens, a câmera utilizada e perda de qualidade ocasionada pela transferência de arquivos. Além disso, observa-se que as cores encontradas pelo código hexadecimal se aproximam de um cinza apesar de ter um valor de L^* conforme para uma classe de cimento branco, e que há a presença de tons amarelados pela coordenada $+b^*$ observada em todas as imagens.

4.3 Requisitos Mecânicos e Caracterização no Estado Fresco

Junto ao ensaio de resistência à compressão axial, foram realizados os ensaios de densidade de massa e índice de consistência das matrizes logo após a confecção dos corpos de prova. Para fins de organização, os resultados destes ensaios serão mostrados neste capítulo.

4.3.1 Densidade de massa (massa específica no estado fresco)

Os resultados da densidade de massa de cada matriz com sua respectiva moldagem estão demonstrados na tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Densidade de massa das misturas realizadas.

Matriz	Moldagem	Massa Específica (g/cm³)	Média das massas esp. (g/cm³)
EGAF-M 0%	1	2,22	2,22
	2	2,22	
	3	2,22	
EGAF-M 55%	1	2,19	2,20
	2	2,21	
	3	2,20	
EGAF-M 75%	1	2,16	2,18
	2	2,18	
	3	2,19	

Fonte: elaborado pelo autor (2023)

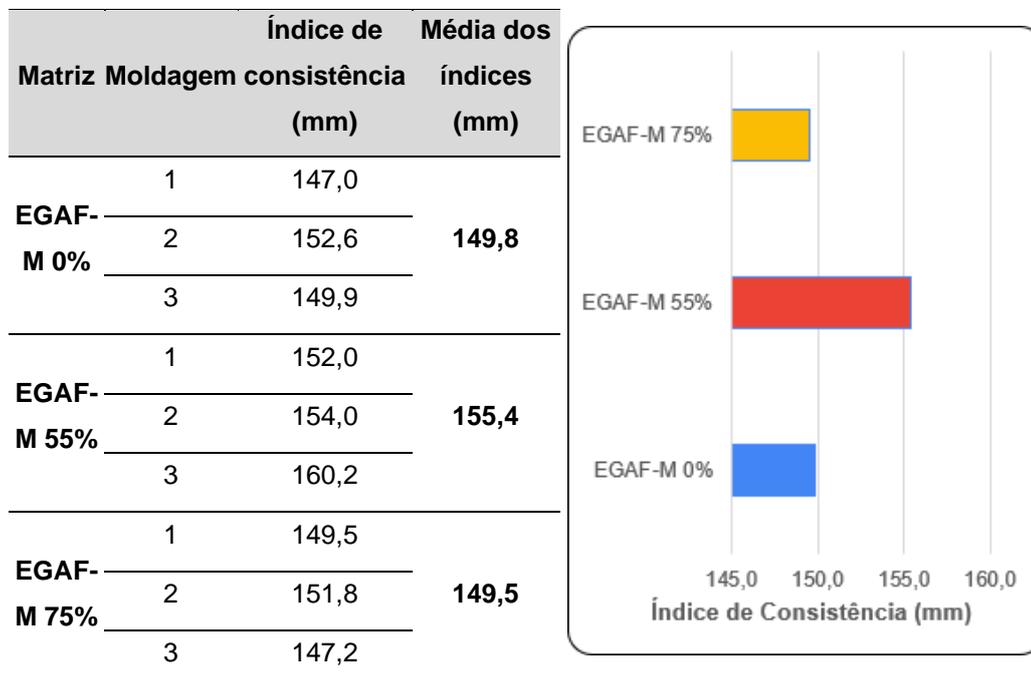
Nota-se que embora os valores encontrados estejam próximos, as médias de cada matriz apontam uma tendência para a diminuição da densidade de massa com o aumento de teor de EAF nas matrizes. Este resultado está coerente, pois conforme mostrado na tabela 3.1, a densidade do coproduto é menor comparado ao do cimento. Este comportamento também foi observado com a massa específica das matrizes anterior a sua hidratação.

4.3.2 Índice de Consistência (Flow-Table)

Os resultados do índice de consistência de cada matriz com sua respectiva moldagem estão demonstrados na tabela 4.9 e no gráfico 4.1:

Tabela 4.9 - Índice de consistência das misturas realizadas.

Gráfico 4.1 - Média dos índices de consistência



Fonte: elaborados pelo autor (2023)

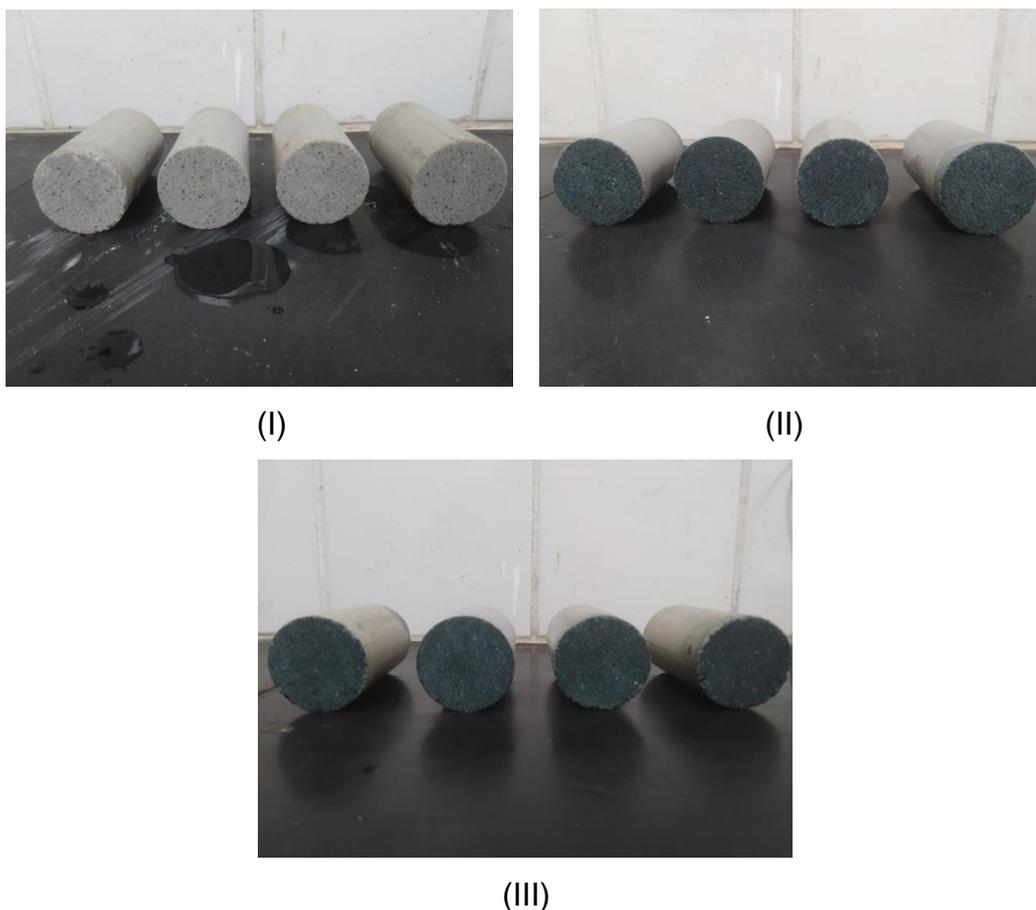
Pode-se observar que houve um aumento do índice de consistência com a incorporação de 55% de EGAF, entretanto, para a incorporação para o teor de 75% o valor encontrado foi próximo ao da matriz de referência. O maior índice encontrado para a matriz de 55% pode estar relacionado com a baixa velocidade de reação da EGAF nos estágios iniciais de hidratação da pasta, ao passo que o coproduto, de maneira significativa, não consome água do traço e fica voltada para a lubrificação das partículas e reação com o clínquer.

Uma hipótese para os valores próximos da matriz EGAF-M 0% e EGAF-M 75% possa estar que ao mesmo tempo que um maior teor de clínquer apresente uma menor trabalhabilidade, devido a maior concentração de fases mineralógicas mais reativas, esteja no contrabalanço com a presença de um material mais fino. Ao comparar os dados de finura Blaine apresentados no tópico 3.3.1, observa-se que a matriz de 75% é composta por matérias com maior superfície específica.

4.3.3 Resistência à compressão mecânica

Anterior ao rompimento dos corpos de prova, todas as amostras passaram pelo processo de retífica para garantir a correta distribuição de carga. Este procedimento também permitiu visualizar a coloração azulada que ocorre com a hidratação da escória no interior das matrizes. A figura 4.1 mostra a seção transversal dos corpos de prova após a retífica.

Figura 4.2 - Seção transversal dos corpos de prova, da esquerda para direita: 0% (I), 55% (II) e 75% (III)



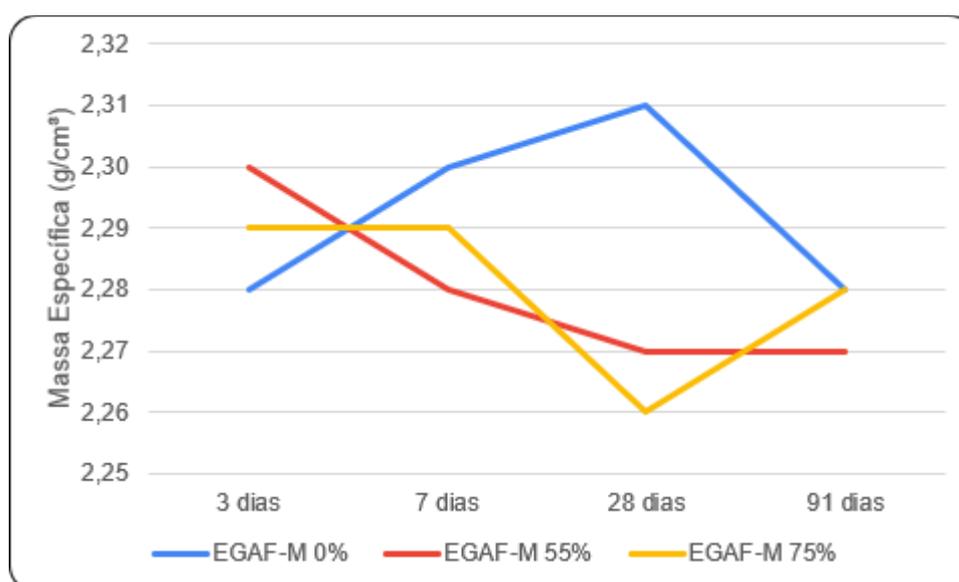
Outro processo também realizado foi a medida de massa específica das matrizes cimentícias no estado endurecido. Os resultados estão demonstrados na tabela 4.10 e a evolução da massa específica com a idade das matrizes no gráfico 4.2.

Tabela 4.10 - Massa específica no estado endurecido das matrizes

Matriz	Massa específica média (g/cm ³)				Massa específica média geral (g/cm ³)
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	
EGAF-M 0%	2,28	2,30	2,31	2,28	2,29
EGAF-M 55%	2,30	2,28	2,27	2,27	2,28
EGAF-M 75%	2,29	2,29	2,26	2,28	2,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 4.2 - Evolução das massas específicas no estado endurecido das matrizes



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os valores encontrados de massa específica não apresentaram uma grande variação, mesmo com a incorporação da escória de alto forno nos diferentes teores. As pequenas variações em relação ao valor médio podem estar associadas à compactação manual que o método de confecção dos corpos de prova exige. Pode-se observar também, que as matrizes com a EGAF apresentam um comportamento parecido quanto à evolução da massa específica endurecida no decorrer das idades. Em seguida, nas tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são demonstradas não apenas as informações de resistência à compressão axial, mas também o desvio relativo máximo (DRM), apontado pela ABNT NBR 7215:2019, como um dos critérios de validação dos ensaios realizados.

Tabela 4.11 - Resistência à compressão axial da matriz EGAF-M 0% e seus respectivos DRM

Idade	Resistência - MPa	Resistência média - MPa	DRM (%)	Média corrigida - MPa	DRM corrigido (%)
3 dias	36,9	36,6	0,82	-	-
	37,5		2,52	-	-
	36,8		0,43	-	-
	35,2		3,77	-	-
7 dias	45,2	40,3	12,05	38,7	-
	42,2		4,62		9,00
	36,8		8,64		4,81
	37,1		8,04		4,19
28 dias	52,5	53,7	2,13	-	-
	51,7		3,75	-	-
	54,6		1,67	-	-
	55,9		4,21	-	-
91 dias	54,8	54,4	0,76	-	-
	54,9		0,80	-	-
	54,4		0,08	-	-
	53,6		1,48	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 4.12 - Resistência à compressão axial da matriz EGAF-M 55% e seus respectivos DRM

Idade	Resistência - MPa	Resistência média - MPa	DRM (%)	Média corrigida - MPa	DRM corrigido (%)
3 dias	22,2	22,2	0,35	-	-
	22,2		0,06	-	-
	22,2		0,00	-	-
	22,1		0,30	-	-
7 dias	36,1	35,1	3,06	33,9	6,67
	32,9		6,03		2,74
	38,6		10,15		-
	32,5		7,17		3,92
28 dias	46,8	43,5	7,79	45,0	4,14
	45,5		4,61		1,07
	38,9		10,51		-
	42,6		1,89		5,21
91 dias	44,9	46,9	4,37	-	-
	49,2		4,92	-	-
	46,5		0,85	-	-
	47,0		0,30	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 4.13 - Resistência à compressão axial da matriz EGAF-M 75% e seus respectivos DRM

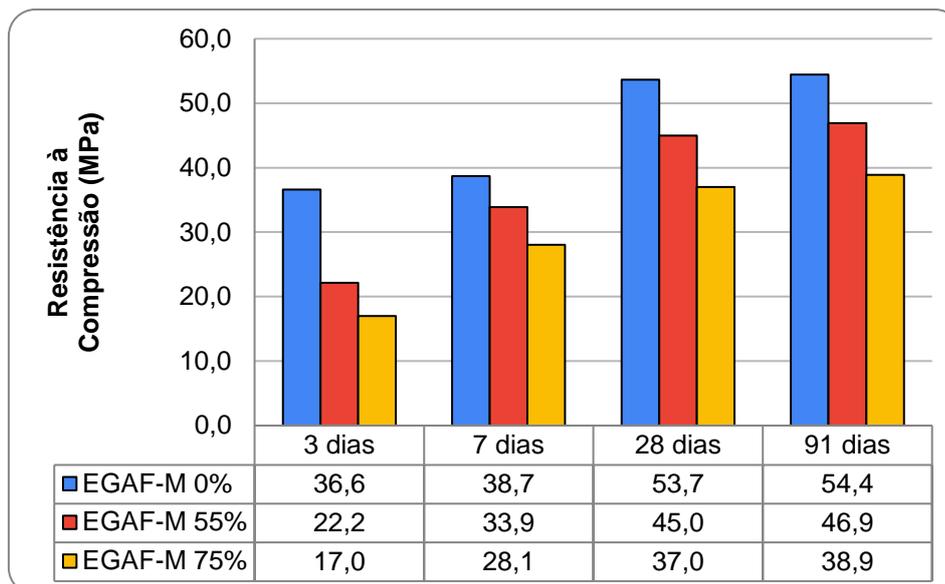
Idade	Resistência - MPa	Resistência média - MPa	DRM (%)	Média corrigida - MPa	DRM corrigido (%)
3 dias	17,8	17,0	4,54	-	-
	17,3		1,80	-	-
	15,3		9,71	-	-
	17,6		3,36	-	-
7 dias	28,7	28,1	2,30	-	-
	27,3		2,69	-	-
	29,5		5,06	-	-
	26,7		4,67	-	-
28 dias	33,3	36,1	7,78	37,0	-
	37,0		2,67		0,07
	36,5		1,05		1,51
	37,6		4,07		1,51
91 dias	38,0	38,9	2,19	-	-
	38,3		1,53	-	-
	38,9		0,08	-	-
	40,4		3,81	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com exceção dos resultados de 7 dias para a matriz de 0% e 55% de EAF, todos os resultados atenderam o requisito de desvio máximo de 6% estipulado para os resultados de compressão axial. Apesar da não conformidade das duas idades mencionadas anteriormente, elas serão consideradas para fins de análise geral dos resultados.

Em seguida, o gráfico 4.3 apresenta a resistência à compressão axial média das matrizes em cada idade e teor de escória de alto forno especificados para este estudo.

Gráfico 4.3 - Desenvolvimento da resistência à compressão axial das matrizes cimentícias



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Conforme mostrado no gráfico, a matriz de referência apresentou maiores valores de resistência para todas as idades, e conforme houve o aumento de incorporação, as matrizes com a escória incorporada apresentaram uma maior redução da resistência.

Este comportamento já era esperado, tanto em função dos estudos mencionados no capítulo de revisão bibliográfica, realizados com a incorporação do coproduto ao CPB, quanto pelo próprio comportamento das reações de hidratação da escória de alto-forno nos cimentos em geral, em função que a EGAF moída é um material com características cimentante, mas que precisa de reserva inicial de hidróxido de cálcio para o começo de suas reações e posterior formação de compostos resistentes, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), por exemplo.

Por fim, a tabela 4.14 mostra a comparação entre as médias calculadas com os requisitos da ABNT NBR 16697:2018, para categoria de resistência que o CPB é contemplado.

Tabela 4.14 - Comparação das resistências encontradas frente à norma 16697:2018

Idade	Resistência à Compressão (MPa)					
	EGAF - M 0%	EGAF - M 55%	EGAF - M 75%	CPB 25	CPB 32	CPB 40
3 dias	36,6	22,2	17,0	8,0	10,0	15,0
7 dias	38,7	33,9	28,1	15,0	20,0	25,0
28 dias	53,7	45,0	37,0	25,0	32,0	40,0
91 dias	54,4	46,9	38,9	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ao analisar os valores de resistência das matrizes, é possível notar que para a matriz com a incorporação de EGAF em 55% atende todos os requisitos obrigatórios de resistência apresentados pela ABNT NBR 16697:2018 das classes que abrangem o CPB. O requisito de 91 dias, porém, é uma determinação facultativa e não contemplada para as variedades brancas, entretanto, para fins de verificação do desenvolvimento de resistência com a escória, observa-se que houve um aumento aproximado de 4,3% em relação aos 28 dias.

Já a matriz com 75% de EGAF, conseguiu atender apenas as determinações de resistência até a classe CPB 32, ao passo que a determinação aos 91 dias observa-se um aumento 5,1% em relação aos 28 dias. Uma possível explicação para o aumento relativo observado, possa estar na maior densificação das partículas, com o maior teor de EGAF que hidratou entre os ensaios de resistência. Apesar disso, a menor resistência compara à matriz de 55% de incorporação de EGAF está relacionado com o menor teor de clínquer, responsável pela produção de Ca(OH)_2 que favorece as reações do coproduto.

Ao levar em conta que a escória aplicada neste estudo é moída para sua utilização na produção de cimentos da classe CP-III, o controle de qualidade em aspectos como composição e granulometria estão orientados para o atendimento de requisitos quanto ao uso deste material para esta classe em específico, ao passo que para as variedades de CPB, estas mesmas características podem variar em função de fatores adicionais ao aglomerante, como a cor por exemplo.

4.4 Avaliação Frente À Norma ABNT NBR 16697:2018

De posse de todos os resultados dos ensaios contemplados pelo programa experimental, e suas respectivas análises, apresenta-se a tabela 4.15, com um compilado de todos os resultados das matrizes ensaiadas, frente aos requisitos da ABNT NBR 16697:2018 para a verificação de sua conformidade.

Ressalta-se aqui, as limitações deste estudo conforme mencionado no capítulo 3 – Metodologia do Estudo, que não foi possível realizar a determinação do óxido de magnésio e nem da brancura conforme a ABNT NBR NM 3:2000. Para o ensaio de brancura, os resultados analisados serviram apenas para demonstrarem um potencial uso da EAF em conjunto com o CPB.

Tabela 4.15 - Comparativo geral das matrizes com a ABNT NBR 16697:2018

		CPB - Ñ Est.	CPB 25	CPB 32	CPB 40	EGAF-M 0%	EGAF-M 55%	EGAF-M 75%
Requisitos Químicos	RI (%)	≤ 7,0		≤ 3,5		0,055	0,165	0,305
	PF (%)	≤ 27,0		≤ 12,0		5,133	0,986	0,035
	SO ₃ (%)			≤ 4,5		3,162	1,616	0,931
Requisitos Físicos	Finura (%)			≤ 12,0		0,80	1,17	0,60
	Início de pega (min)			≥ 60		75	100	120
	final de pega (min)			≤ 600		120	150	180
	Expansibilidade a quente (mm)			≤ 5		0,47	0,28	0,26
Requisitos mecânicos (MPa)	3 dias	5,0	8,0	10,0	15,0	36,6	22,2	17,0
	7 dias	7,0	15,0	20,0	25,0	38,7	33,9	28,1
	28 dias	10,0	25,0	32,0	40,0	53,7	45,0	37,0
	91 dias	-	-	-	-	54,4	46,9	38,9
Brancura (%)		≥ 82		≥ 78		89,2	84,0	84,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A matriz EGAF-M 0%, conforme esperado, atende aos requisitos analisados neste trabalho, uma vez que é composta apenas pelo CPB já comercializado. Em relação às matrizes compostas, tanto a EGAF-M 55% e a EGAF-M 75% atenderam todos os requisitos físicos e químicos ensaiados, enquanto os requisitos mecânicos não foram atendidos para todas as classes da matriz de maior incorporação.

Em específico, nos requisitos químicos, observou-se que a incorporação de escória em ambos os teores promoveu um maior intervalo para aceitação das matrizes, visto que todos os resultados apresentaram uma diminuição do componente de norma analisado.

Já nos requisitos físicos, para a finura e expansibilidade à quente, observou-se um comportamento similar aos requisitos químicos, o qual a incorporação da escória promoveu uma maior folga para os limites superiores estabelecidos, embora para a finura da matriz de 55%, observou-se uma maior finura. Já os tempos de pegadas, a tendência observada é que o aumento da incorporação do coproduto promoveu maiores períodos com o qual o material pode ser trabalhado até o início das reações de hidratação, ao passo que o final das reações também foi postergado. Conforme discutido no tópico sobre os tempos de pega, este comportamento já era esperado em função da natureza da hidratação da escória. Apesar do adiamento, os tempos se encontra dentro do estabelecido em norma.

Em relação aos requisitos mecânicos, observou-se que a matriz EGAF-M 55% foi capaz de atender a resistência solicitada aos 28 dias, enquanto a EGAF-M 75%, embora tenha se aproximado da resistência de 40 MPa, o grupo amostral não foi capaz de alcançar o valor solicitado em norma, o que deixa a matriz mais apta para a classificação de um CPB 32.

Por fim, nos resultados quanto à brancura, embora o procedimento seja adaptado, ele não é contemplado pela normativa que especifica o ensaio. Ainda assim, para fins de análise, as matrizes apresentaram valores altos de brancura, ao passo que todas elas demonstram um potencial de serem empregadas até mesmo para fins não estruturais, onde a exigência de brancura é maior em relação aos cimentos de uso estrutural.

5 CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho das misturas de clínquer Portland branco com a incorporação da escória granulada de alto-forno em teores de substituição em massa de 55% e 75% em relação a um cimento de designação CPB já comercializado.

O desempenho das matrizes foi avaliado conforme os requisitos químicos, físicos e mecânicos contemplados pela ABNT NBR 16697:2018, que discorre sobre os parâmetros de viabilidade de um cimento para ser comercializado. Em especial para o CPB é adicionado também um critério de brancura.

Todos os requisitos foram avaliados conforme as referências normativas que compõem a ABNT NBR 16697:2018, e após a realização dos ensaios, as seguintes conclusões e classificações puderem ser feitas:

- A matriz EGAF-M 55% tem potencial para se encaixar com a denominação CPB 40;
- A matriz EGAF-M 75% tem potencial para se encaixar com a denominação CPB 32;

Os resultados ficam descritos como potenciais, pois conforme mencionado no capítulo de métodos, dois ensaios não puderam ser realizados, o de determinação do óxido de magnésio e a brancura conforme a ABNT NBR NM 3:2000, ao passo que a metodologia aqui neste estudo foi uma adaptação.

Portanto, a incorporação de EGAF ao CPB se apresenta como uma possível alternativa para a melhor difusão desta classe de aglomerantes. Outro fato importante, está na diminuição da quantidade de clínquer utilizada para a fabricação da variedade branca, ao considerar que a matriz EGAF-M 55% consegue atingir os requisitos até a maior classe de resistência para os CPBs, e possui uma substituição de mais da metade da massa total de clínquer por EGAF, a matriz possibilita uma alternativa ao aspecto de consumo energético intensivo para a produção de CPB.

Apesar de não ter alcançado o requisito de maior resistência, a matriz EGAF 75% ainda assim pode se encaixar na classe intermediária de resistência para os CPBs. Embora o material em um não possa ser aplicado em obras de grandes solicitações de carga, usos em menor escala, como construções de poucos pavimentos, ou até usos não estruturais, podem vir a ser alternativas para absorver essa variedade que apresenta 3/4 de sua massa total substituída em clínquer, o que possibilita ainda mais a redução quanto à questão energética observadas na matriz EGAF-M 55%

5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Para as sugestões em estudos futuros, podem ser feitos os seguintes estudos:

- Verificação da composição química por meio de ensaios de espectrometria de raios-X, a fim de demonstrar valores exatos da composição das matrizes;
- Análise colorimétrica das matrizes não apenas pelo método da ABNT NBR NM 3:2000, mas também por normativas internacionais;
- Comparação das matrizes com cimentos de classe CP-III, de mesmos teores de incorporação de escória de alto-forno;
- Avaliação de granulometrias mais finas para a escória e sua influência no estado fresco e endurecido do concreto/argamassa/pasta.
- Avaliação das matrizes junto ao uso de pigmentos;
 - Verificação da compatibilidade das matrizes com pigmento à base de dióxido de titânio, para situações de concretos fotocatalíticos.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2018.

_____. **ABNT NBR NM 03: Cimento Portland — Determinação da Brancura**. Rio de Janeiro. 2000.

_____. **ABNT NBR NM 15: Cimento Portland — Análise química — Determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **ABNT NBR NM 16: Cimento Portland — Análise química — Determinação de anidrido sulfúrico**. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **ABNT NBR NM 18: Cimento Portland — Análise química — Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro. 2012.

_____. **ABNT NBR 7215:2019: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2019.

_____. **ABNT NBR 11582:2016: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**. Rio de Janeiro. 2016.

_____. **ABNT NBR 11579:2013: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro. 2013.

_____. **ABNT NBR 13276:2016: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. 2016.

_____. **ABNT NBR 13278:2005:Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro. 2005

_____. **ABNT NBR 16372:2015: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro. 2015.

_____. **ABNT NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2017.

_____. **ABNT NBR 16606:2018: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro. 2018.

_____. **ABNT NBR 16607:2018: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro. 2018.

_____. **ABNT NBR 16697:2018: Cimento Portland — Requisitos.** Rio de Janeiro. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150/C150M- 18: Standard Specification for Portland Cement.** Philadelphia, 2018.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Reciclagem de Escória de Alto Forno no Brasil.** Anais. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, 2000.

APÓS 34 meses desativado e uma grande reforma, alto-forno da Usiminas é reativado. **Conexão Mineral.** São Paulo, 18 de abril de 2018. Disponível em: <<https://www.conexaomineral.com.br/noticia/984/apos-34-meses-desativado-e-uma-grande-reforma-alto-forno-da-usiminas-e-reativado.html>> Acesso em 20 de janeiro de 2023.

BATTAGIN, A. F. Cap. 6 - Cimento Portland. *In:* TUTIKIAN, B. F. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** Volume I - 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2022. 921 p. 15,5 cm x 23cm, ISBN: 978-65-89675-00-6.

BARIN, D. S. **Carbonatação e Absorção Capilar em Concretos de Cimento Portland Branco com Altos Teores de Adição de Escória de Alto Forno e Ativador Químico.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

BARBOSA, F. R.; ANDRADE, S. T.; ALMEIDA, N. O.; OLIVEIRA, M.; REGIS, P.; CARNEIRO, A. M. P. **Estudo Comparativo entre as Propriedades Mecânicas de Concretos Convencionais e com Cimento Portland Branco.** Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, Recife, 2005.

CASSAR L.; PEPE, C.; TOGNON, G.; GUERRINI, G. L.; AMADELLI, R. **White Cement for Architectural Concrete, Possessing Photocatalytic Properties.** 11th Int. Congress on the Chemistry of Cement. Durban, 2003.

CHURCH of 2000 / Richard Meier & Partners". **ArchDaily**, 2009. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/20105/church-of-2000-richard-meier>>. Acesso em: 19 de Janeiro de 2023.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

DELLINGHAUSEN, L. M. **Retração Total e Penetração de Cloretos em Concretos com Cimento Portland Branco e Escória de Alto Forno**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009.

FERRARI, B. L.; SILVA, R. C. **Revisão Bibliográfica do Uso de Coprodutos Siderúrgicos como Materiais de Construção Civil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória.

G&C COLORS, SA. **Colouring Mortar and Concrete Products**. Espanha, 2013. Disponível em: <<http://www.gc-colors.es/eng/descargas/docdow.php?id=145>>. Acesso em: janeiro 20 de dezembro de 2022.

GOBBO, L. A. **Aplicação da Difração de Raios-X e Método de Rietveld no Estudo de Cimento Portland**. Tese de Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente. Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GUO, M.; POON, C. S. **Superior photocatalytic NO_x removal of cementitious materials prepared with white cement over ordinary Portland cement and the underlying mechanisms**. Cement and Concrete Composites, Volume 90, p. 42-49. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu, China, 2018.

HAMAD, B. S. **Investigations of Chemical and Physical Properties of White Cement Concrete**. Advanced Cement Based Materials, 2^a edição, p. 161–167. Universidade Americana de Beirute, Líbano, 1995.

HELM, J.. **Fundação Iberê Camargo / Alvaro Siza**. ArchDaily Brasil, ISSN 0719-8906, 4 de dezembro de 2011. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-2498/fundacao-ibere-camargo-alvaro-siza>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2023.

HOSSEINI, P.; ALBOHASANI, M.; MIRZAEI, F.; ANBARAN, M. R. K.; KHAKSARI, Y. **Influence of Two Types of Nanosilica Hydrosols on Short-Term Properties of**

Sustainable White Portland Cement Mortar. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 30, Issue , 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário estatístico do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=720>. Acesso em: 26 jul. 2022.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Tracking cement 2020 - Tracking report - june 2020.** Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf> Acesso em: 11 de junho 2022.

JANG, H.; KANG, H., S, S. **Color Expression Characteristics and Physical Properties of Colored Mortar using Ground Granulated Blast Furnace Slag and White Portland Cement.** KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 18, Issue 4, 2014, Pages 1125-1132, 2014.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Concreto Branco.** In: Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações. Geraldo Isaia (Ed.). IBRACON, São Paulo, 2005.

KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Concreto Branco.** In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Volume II - 3ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2022. 1134 p. 15,5 cm x 23cm, ISBN: 978-65-89675-17-4.

LEVINSON, R.; AKBARI, H. **Effects of composition and exposure on the solar reflectance of Portland cement concrete.** Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 11, 2002, Pages 1679-1698, ISSN 0008-8846.

LING, T. C.; POON, C. S. **Feasible use of large volumes of GGBS in 100% recycled glass architectural mortar.** Cement & Concrete Composites, Volume 53, Pages 350-356, 2014.

LÜBECK, A. **Resistividade Elétrica de Concretos de Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

MASSUCATO, J. C. **Utilização de Escória de Alto-Forno à Carvão Vegetal como Adição no Concreto**. Dissertação de Mestrado na Área de Concentração em Edificações. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, São Paulo, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MORESOVÁ, K.; ŠKVÁRA, F. **White Cement - Properties, Manufacture, Prospects**. Ceramics-Silikáty, 4^a edição, p. 158-163. Department of Glass and Ceramics, Institute of Chemical Technology, Czech Republic, 2001.

MOTA, B.; MATSCHEI, T.; SCRIVENER, K. **Impact of sodium gluconate on white cement-slag systems with Na₂SO₄**. Cement and Concrete Research, Volume 122, Pages 59-71, 2019.

HAMAD, B. S. **Investigations of Chemical and Physical Properties of White Cement Concrete**. Advanced Cement Based Materials, 2^a edição, p. 161–167. Universidade Americana de Beirute, Líbano ,1995.

NEHRING, V.; SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; PAIVA, F. F. G.; Silva, I. M.; Kinoshita, A. **Utilização da Escória de Alto Forno em Materiais Cimentícios**. Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332. São Paulo. Volume 12, 2^a edição. p. 38-44. Dezembro, 2020.

NERO, J. M. G.; NUNES A. **Betão Branco Prescrição e Utilização**. Secil. Portugal, 2008. Disponível em: <<https://issuu.com/globept/docs/bbprescutil>>. Acesso em: 04 de janeiro de 2023.

PASSUELO, A. **Análise de Parâmetros Influentes na Cromaticidade e no Comportamento Mecânico de Concretos à Base de Cimento Branco**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

PECCHIO. M. **A Influência de Fósforo, Enxofre e Estrôncio na Mineralogia do Clínquer Portland**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, 2013.

PONTE Irineu Bornhausen. **Brusque Memória**, 2004. Disponível em: <<https://www.brusquememoria.com.br/site/local/11/Ponte-Irineu-Bornhausen>> Acesso em: 19 de janeiro de 2023.

REYES-CARMONA, J. F.; FELIPPE, M. S.; FELIPPE, W. T. **Biom mineralization Ability and Interaction of Mineral Trioxide Aggregate and White Portland Cement With Dentin in a Phosphate-containing Fluid**. *Journal of Endodontics*, v. 35, n. 5, p. 731-736. Maio, 2009.

SCRIVENER, K. L.; VANDERLEY, M. J.; ELLIS, W. G.; UN Environment. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry**. *Cement and Concrete Research*, 114. p. 2–26. 2018.

SILVA FILHO, L. C. P.; DAL MOLIN D. C. C.; KIRCHHEIM, A. P.; PASSUELO, A.; PASA, V. F. **Uso do Concreto Branco Estrutural: Museu Iberê Camargo**. Novembro, 2004. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. In: II Seminário de Patologia das Edificações. Porto Alegre, 2004.

SIQUEIRA, H. C. **Penetração de Cloretos em Concretos Compostos com Cimento Portland Branco e Escória de Alto Forno, Ativados Quimicamente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

VIEIRA, K. K. **Penetração de Cloretos em Concretos Compostos com Cimento Portland Branco e Escória de Alto Forno, Ativados Quimicamente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.